

沟垄集雨种植补灌对冬小麦旗叶叶绿素 荧光参数的影响

张 玉^{1,2}, 丁瑞霞^{1,2}, 韩清芳^{1,2}, 贾志宽^{1,2},
任小龙^{1,2}, 聂俊峰^{1,2}, 杨宝平^{1,2}

(1. 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 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. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为探明沟垄集雨种植技术在灌区对作物光合作用和产量的调控及节水效果, 通过大田试验, 研究了两种宽度的沟垄集雨种植结合不同补灌量处理对冬小麦光合速率、叶绿素荧光参数和产量的影响。结果表明: 沟垄集雨处理下 P_n 较平作不灌水处理 (CK) 提高 57.1% ~ 84.4%, 较平作灌水处理提高 25.3% ~ 50.3%; F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 和籽粒产量也均高于平作处理, qN 低于平作处理; 两种宽度沟垄集雨种植较 CK 增产 74.6% ~ 124.9%, 沟垄集雨补灌处理较平作灌水处理增产 0.3% ~ 18.9%, 随灌水量增加产量增加, 宽垄沟优于窄垄沟; 在降雨较少的年份, 60 cm 沟垄集雨种植在灌溉量减少 50% 的条件下, 光能转化效率比平作灌水处理提高 44.1%, 说明沟垄集雨种植可显著提高光能的转化效率及其量子产额, 提高光合效率, 维持较高的籽粒产量。

关键词: 冬小麦; 沟垄集雨种植; 补灌; 叶绿素荧光参数; 产量

中图分类号: S512.1+1; S507.1 **文献标志码:** A

Effects of ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in winter wheat flag leaf

ZHANG Yu^{1,2}, DING Rui-xia^{1,2}, HAN Qing-fang^{1,2}, JIA Zhi-kuan^{1,2},
REN Xiao-long^{1,2}, NIE Jun-feng^{1,2}, YANG Bao-ping^{1,2}

(1. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University/Key Laboratory of
Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the regulation of crop photosynthesis and output and water saving effect under ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation in Guanzhong irrigation district. We studied the effects of photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters and yield of winter wheat. The results showed that P_n of ridge and furrow rain harvesting which were 57.1% ~ 84.4% and 25.3% ~ 50.3% higher than that of CK and border irrigation, F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP and yield of each ridge and furrow rain harvesting treatments were also higher than that of flat planting, but qN was opposite. Both two width of ridge and furrow rain harvesting treatments boosted grain yield by 74.6% ~ 124.9% compared with CK, ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation treatments enhanced grain yield compared with border irrigation by 0.3% ~ 18.9%, the higher irrigation amount the higher yield, and the wide furrow was better than the narrow one. Therefore, in the year of less rainfall, efficiency of light energy conversion increased by 44.1% under 60 cm rain harvesting cultivation. It is concluded that ridge and furrow rainfall harvesting could improve the efficiency of light energy conversion and the quantum yield, improve the

收稿日期: 2014-06-07

基金项目: 国家 863 课题 (2013AA102902); “十二五”国家科技支撑计划课题 (2012BAD09B03)

作者简介: 张 玉 (1988—), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事植物资源高效利用研究。E-mail: jade_zhangyu@163.com。

通信作者: 韩清芳 (1969—), 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业水分高效利用及光合生境调控研究。E-mail: hanqf88@nwsuaf.edu.cn。

efficiency of photosynthesis and maintain higher grain yield under the conditions of half supplemental irrigation amount of border irrigation.

Keywords: winter wheat; ridge and furrow rain harvesting; supplemental irrigation; chlorophyll fluorescence parameters; yield

我国种植业长期以来采用粗放型灌溉方式,水分利用效率很低,现有灌溉用水量超过合理灌溉用水量 0.5~1.5 倍^[1]。作物需水关键期进行适量补充灌溉能大幅提高作物产量水平^[2],对于灌溉农田,研究和生产往往重视灌溉方式的节水作用,忽视种植方式对灌溉用水量的影响。为缓解农业缺水问题,必须从传统的粗放型灌溉农业和旱地雨养农业向现代高效节水型灌溉农业、节水型旱作生态农业转变。过去 30 年,田间微集雨种植技术已逐渐发展成为旱区的主要节水技术^[3],并在玉米、小麦、马铃薯、谷子、苜蓿^[4-10]等作物上进行了广泛试验。该技术在降雨稀少的地区具有显著的增产作用^[9],能显著提高水分利用效率。目前,田间沟垄集雨种植技术在灌区的应用并未受到重视,关于集雨种植结合需水关键期补充灌溉节水的研究极少。开展沟垄集雨种植补灌技术研究,对灌区通过旱作种植技术在提高降雨利用效率的基础上节约灌溉水、丰富灌溉理论和创新节水灌溉技术有着十分重要的意义。

小麦绿色部分通过光合作用所制造的产物占小麦产量的 90% 以上^[11],灌浆期叶片净光合速率 P_n 与籽粒产量极显著相关^[12]。叶绿素荧光参数的变化与光合作用的各过程密切相关,叶绿素荧光动力学技术被称为测定叶片光合功能快速、无损伤的探针^[13]。关于不同灌水量^[14-15]、不同灌水时期^[16]及不同耕作措施^[17]下叶绿素荧光参数与光合作用变化已做了大量研究。本试验通过设置沟垄集雨种植条件下不同灌溉量处理,以平作种植为对照,研究沟垄集雨种植结合补灌对冬小麦叶绿素荧光参数的影响,探讨其对冬小麦水分利用效率及产量影响的光合生理基础,为旱作技术与灌溉技术的结合应用在灌区推广提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年 10 月—2013 年 6 月在陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验站(E108°04', N34°20', 海拔 454.8 m)进行,该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上。近 20 年年均气温 13.5℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温 -19.4℃,

$\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 4 800℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4 143℃,全年太阳总辐射为 $4.808 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,属暖温带半湿润偏旱型气候,冬、春季降水偏少、干旱,多年平均降水量 580.5 mm,其中小麦生长期降水量 310.0 mm。降雨主要集中在 7—9 月三个月,年均蒸发量 993.2 mm,干旱指数为 1.3~1.59。

试验地地势平坦,土壤为塿土,耕层(0~20 cm)土壤有机质 $11.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $6.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $53.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $22.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $97.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 7.59,容重 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

选用当地主栽冬小麦品种小偃 22 号,设种植方式和灌水量两个试验因素,其中种植方式设沟垄集雨种植和传统平作两个水平,沟垄集雨种植的沟:垄宽度设 40 cm:40 cm 和 60 cm:60 cm 两种类型。沟垄集雨种植处理设不灌溉、补灌 $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 三个水平灌水量,平作处理设不灌溉、灌 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个水平灌水量,共 8 个处理,试验处理及编号见表 1。小区面积为 25.2 m^2 ($3.6 \text{ m} \times 7 \text{ m}$),各处理重复 3 次,随机区组排列。沟垄集雨种植垄高均为 15 cm,垄上覆膜,沟内种植小麦,平作不起垄不覆膜。60 cm 沟垄集雨种植每沟等行距种 4 行,平作对应一垄一沟种 6 行;40 cm 沟垄集雨种植每沟种 3 行,平作对应一垄一沟种 4 行。播前整地基施 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷酸二铵, $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 硫酸钾,拔节期按 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素进行追肥。2012 年 10 月 14 日播种,人工开沟条播,各处理行距均为 20 cm,播种量 $240 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($240 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$),其它栽培管理同当地大田。2013 年 6 月 1 日收获。灌溉在冬小麦返青期(2013 年 3 月 14 日)进行,灌溉水源为地下水,用水表严格控制灌溉量。试验期间降水分布如图 1,休闲期降水总量 432.9 mm,试验冬小麦生长期降水 223.7 mm,属于偏旱年型。

1.3 测定项目

1.3.1 净光合速率 于冬小麦抽穗期(4 月 12 日)、扬花期(4 月 24 日)、灌浆期(5 月 2 日)的晴天上午 9:00—11:00,用美国生产的 Li-6400 便携式光合作

用测定仪测定旗叶净光合速率(P_n),每个小区 3 次取样,每处理 3 次重复。沟垄集雨种植处理边行与中行分别测定,取其平均值与平作进行对比。

表 1 试验处理
Table 1 The experimental treatment

处理 Treatments	种植方式 Planting pattern	灌水量 Irrigation volume /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
T1	60 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	0
T2	60 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	375
T3	60 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	750
T4	40 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	0
T5	40 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	375
T6	40 cm 沟垄集雨 Ridge and furrow rainwater harvesting	750
T7	平作 Flat planting	750
CK	平作 Flat planting	0

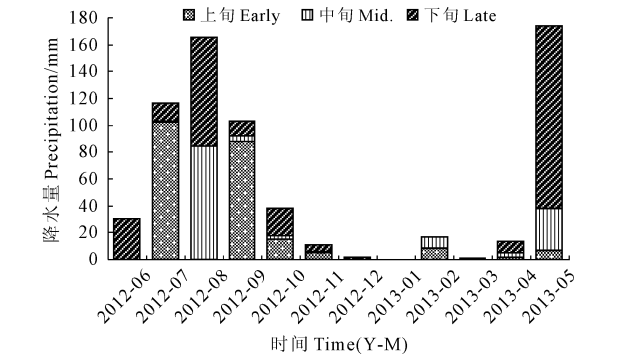


图 1 试验期间降水量分布

Fig.1 The precipitation distribution during the test

1.3.2 叶绿素荧光参数 于冬小麦抽穗期(4 月 13 日)、扬花期(4 月 25 日)、灌浆期(5 月 3 日)利用 PAM-2100(Walz, Germany)便携式叶绿素荧光仪,随机选取长势一致的冬小麦旗叶,测定暗反应 30 min 后的叶片初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、以及自然光条件下最大荧光(F_m')和稳态荧光(F_s)等荧光参数,每小区 5 次取样,每处理 3 次重复。并计算荧光参数 PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(qN)。其中 $F_v = F_m - F_o$, $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o)$, $qN = (F_m - F_m')/F_m'$ 。沟垄集雨种

植处理边行与中行分别测定,取其平均值与平作进行对比。

1.3.3 冬小麦产量 在冬小麦成熟后收获 1 m 行长内植株,考查产量构成因素,各小区单收单打,统计产量,其中集雨种植区边行与中行分别收获,取平均值与平作进行比较。

集雨种植处理产量计算公式:边(中)行产量 = 单位面积边(中)行产量 $\times$ 面积 $\times$ 种植系数 $\times$ 边(中)行系数。其中:种植系数 = 一沟种植行数/平作对照一垄一沟宽度种植行数;边(中)行系数 = 一沟内边(中)行数/一沟内种植总行数。

平作处理产量计算公式:产量 = 单位面积产量 $\times$ 面积。

1.4 统计方法

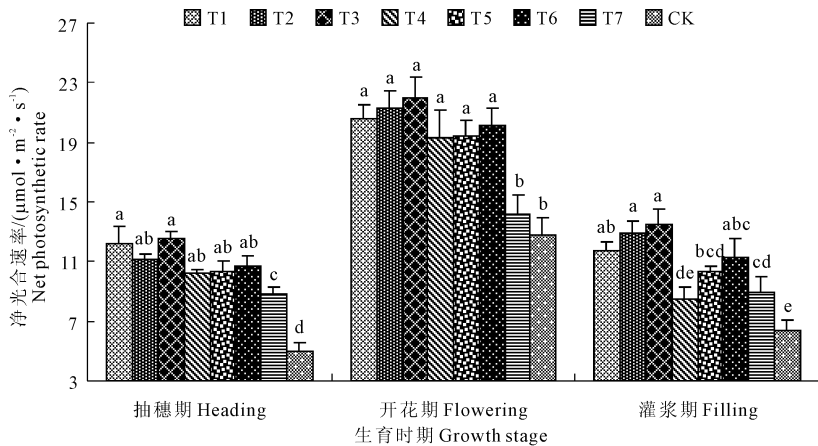
采用 Excel2003 进行数据处理并作图,用 DPSv7.05 软件分析数据并进行 Duncan 新复极差检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理下旗叶净光合速率的变化

各处理旗叶净光合速率随生育进程推进呈先增加后降低趋势,在扬花期达到最大值,灌浆期净光合速率下降(图 2)。抽穗期,沟垄集雨种植处理显著高于平作处理($P < 0.05$),各沟垄集雨种植处理之间差异不显著,以 T3 值为最高,平作灌水处理 T7 显著高于平作不灌水处理 CK($P < 0.05$)。扬花期平作灌水处理 T7 的净光合速率值略高于平作不灌水处理 CK,差异不显著,其余各处理的净光合速率变化与抽穗期基本一致。灌浆期平作不灌水处理 CK 略低于 40 cm 沟垄集雨不补灌处理 T4,显著低于其他处理($P < 0.05$),60 cm 沟垄集雨补灌处理 T2、T3 的净光合速率显著高于各处理。

各生育时期旗叶净光合速率的平均值大小为 $T3 > T2 > T1 > T6 > T5 > T4 > T7 > CK$ 。T1 和 T4 分别比 CK 提高了 84.4% 和 57.1% ($P < 0.01$)。T2、T3、T5 和 T6 分别比 T7 增加了 42.1%、50.3%、25.3% 和 31.6%,T7 比 CK 提高了 32.3%,差异均达到了极显著水平($P < 0.01$)。整体表现为相同种植方式下随灌水量增加,旗叶净光合速率增加,相同灌溉条件下沟垄集雨种植处理旗叶净光合速率高于平作处理,宽垄沟高于窄垄沟,表明集雨种植结合补灌措施能维持冬小麦生育后期旗叶较高水平的光合速率,为高产奠定基础。



注:图中数据为 3 次重复平均值,柱上所示不同字母表示种植方式间差异显著(Duncan 法)。下同。
Note: Data in the figure are the mean of 3 replicates. Values showed with a different letter are significantly different at $P < 0.05$ according to Duncan test. The same below.

图 2 不同生育时期各处理冬小麦的旗叶净光合速率(P_n)

Fig.2 The net photosynthetic rate of flag leaf at different growth stages under different treatments.

2.2 不同处理下旗叶 F_o 、 F_m 和 F_v 的变化

初始荧光 F_o 为不参与 PS II (光系统 II) 光化学反应的光能辐射部分,代表了 PS II 反应中心全部开放即原初电子受体(QA)全部氧化时的荧光水平,因此可根据 F_o 的变化推测反应中心的状况和可能的光保护机制^[18]。从表 2 可以看出,各处理初始荧光

F_o 在各生育期间变化很小,沟垄集雨种植处理之间无显著差异,但均高于平作。不同种植方式下灌水处理均高于不灌水处理,表明灌水可以提高旗叶光化学活性,沟垄集雨处理光化学活性显著高于平作处理($P < 0.05$)。

表 2 不同处理对冬小麦各生育期 F_o 、 F_m 和 F_v 的影响

Table 2 Effects of F_o , F_m and F_v at different growth stages under different treatments

处理 Treatments	初始荧光 F_o			最大荧光 F_m			可变荧光 F_v		
	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling
T1	0.28abc	0.28b	0.27b	0.44cd	0.44cd	0.47bc	0.16b	0.16bcd	0.20ab
T2	0.31ab	0.29ab	0.29a	0.54ab	0.58a	0.53ab	0.23ab	0.30a	0.24a
T3	0.31a	0.31a	0.31a	0.60a	0.60a	0.56a	0.29a	0.30a	0.25a
T4	0.28abc	0.28b	0.24cd	0.41cd	0.41cde	0.36de	0.13b	0.13cd	0.12cd
T5	0.31a	0.29ab	0.25bcd	0.44cd	0.47bc	0.40cd	0.16b	0.19bc	0.16bc
T6	0.28ab	0.31a	0.25bcd	0.47bc	0.53ab	0.42cd	0.16b	0.22b	0.17bc
T7	0.25cd	0.26c	0.26bc	0.40cd	0.37de	0.37de	0.15b	0.11d	0.11cd
CK	0.23d	0.24c	0.23d	0.36d	0.36e	0.31e	0.13b	0.12cd	0.08d

注:表中数据为 5 次重复的平均值。数据后不同字母表示种植方式间差异显著(Duncan 法)。下同。
Note: Data in the table are the mean of 5 replicates. Values followed by a different letter are significantly different at $P < 0.05$ according to Duncan test. The same below.

最大荧光 F_m 在各生育期均表现为沟垄集雨处理高于平作处理,与 F_o 表现基本一致。平作种植灌水或不灌水处理的 F_m 随生育进程呈下降趋势,沟垄集雨处理以 T3 值为最高,显著高于平作各处理和集雨不补灌处理。相同种植方式下,最大荧光 F_m 随灌水量增加而增加,相同灌水量条件下,60 cm 沟垄集雨处理高于 40 cm 沟垄集雨处理,灌浆期 60

cm 沟垄集雨处理显著高于平作各处理($P < 0.05$)。说明 60 cm 沟垄集雨种植能降低灌浆期冬小麦 PS II 反应中心电子传递的破坏。
可变荧光 F_v 反映了可参与 PS II 光化学反应的光能辐射部分,体现了 QA 的还原情况。各生育时期沟垄集雨种植的可变荧光 F_v 均高于平作种植,表明沟垄集雨种植能够增加参与光化学反应的光能

辐射,沟垄集雨补灌处理的 F_v 值在扬花期最高,这与净光合速率的变化一致。沟垄集雨处理的 F_o 、 F_m 、 F_v 生育期平均值分别较平作灌水处理 T7 显著提高 4.6% ~ 11.9%、3.8% ~ 54.7%、2.4% ~ 122.3% ($P < 0.05$),说明平作处理在干旱条件下 F_v 的降低主要是由于 F_m 的降低而导致,与 Krause 等^[19]提出的光抑制结果类似。

2.3 不同处理下旗叶 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的变化

F_v/F_m 和 F_v/F_o 是表明光化学反应状况的两个重要参数,常用以度量植物叶片 PS II 原初光能转化效率和 PS II 潜在活性。

抽穗期 T3 的 F_v/F_m 显著高于 T4($P < 0.05$),其他处理间差异不显著(表 3)。扬花期和灌浆期沟垄集雨补灌处理显著高于平作灌水和不灌水处理 ($P < 0.05$),相同灌溉条件下 60 cm 沟垄集雨处理高于 40 cm 沟垄集雨处理,各生育时期平均值大小为 $T3 > T2 > T6 > T1 > T5 > T4 = T7 > CK$,T3 分别比 T6、T7 显著提高了 20.8% ($P < 0.05$)、44.1% ($P < 0.01$),而 T7 仅比 CK 增加了 2.7%,差异不显著,表明沟垄集雨种植处理能较平作处理提高最大光化学反应效率,减少了光化学抑制现象,同时宽垄沟较窄垄沟作用更显著。

表 3 不同处理对冬小麦各生育期 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的影响
Table 3 Effects of F_v/F_m and F_v/F_o at different growth stages under different treatments

处理 Treatments	F_v/F_m				F_v/F_o			
	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	平均 Average	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	平均 Average
T1	0.36ab	0.35cd	0.42a	0.38b	0.57ab	0.56cd	0.75a	0.63b
T2	0.42ab	0.51a	0.45a	0.46a	0.76ab	1.04a	0.82a	0.88a
T3	0.46a	0.48ab	0.44a	0.46a	0.94a	0.95ab	0.80a	0.90a
T4	0.31b	0.31d	0.34bc	0.32bc	0.48b	0.46cd	0.52bcd	0.49b
T5	0.36ab	0.37c	0.39ab	0.37bc	0.62ab	0.65c	0.65ab	0.64b
T6	0.34ab	0.41bc	0.40ab	0.38b	0.51b	0.72bc	0.69ab	0.64b
T7	0.37ab	0.30d	0.29cd	0.32bc	0.60ab	0.43d	0.44cd	0.49b
CK	0.36ab	0.31d	0.26d	0.31c	0.57b	0.48cd	0.37d	0.47b

F_v/F_o 在各处理间的表现与 F_v/F_m 表现一致。扬花期和灌浆期沟垄集雨补灌处理 F_v/F_o 显著高于平作灌水和不灌水处理 ($P < 0.05$),表明沟垄集雨处理比平作处理具有较大 PS II 潜在活性。相同灌溉条件下 60 cm 沟垄集雨处理的 F_v/F_o 高于 40 cm 沟垄集雨处理。生育时期平均 F_v/F_o 依次为 $T3 > T2 > T5 > T6 > T1 > T4 > T7 > CK$ 。T7 与 CK 差异不显著,T1 比 T4、CK 分别增加了 28.5%、32.8% ($P < 0.01$),T2 比 T5、T7 分别提高了 37.1%、79.2% ($P < 0.01$),T3 比 T6、T7 分别增加了 40.4%、83.3% ($P < 0.01$)。说明沟垄集雨种植在减少一半灌水量的条件下仍能较平作灌水保持高的光化学活性和潜在活性,为高产节水效应提供生理支持,并且宽垄沟集雨处理效果优于窄垄沟。

2.4 不同处理下冬小麦生育期 qP 和 qN 的变化

光化学淬灭系数(qP)是对 PS II 原初电子受体 QA 氧化态的一种量度,代表 PS II 反应中心开放数目的比例^[13],反映了 PS II 天线色素捕获的光能转化为化学能的效率。 qP 下降表明抑制了小麦旗叶 PS II 光合电子传递活性^[20]。

非光化学淬灭(qN)反映的是 PS II 天线色素吸

收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分,是一种自我保护机制。如果不能及时地耗散 PS II 反应中心天线色素吸收的过量光能,将对光合机构造成破坏或使其失活^[18]。

由表 4 可看出,沟垄集雨处理的光化学淬灭系数 qP 整体高于平作处理,除 T2、T3 抽穗期和扬花期 qP 值基本无变化,灌浆期有所降低外,其余各处理均随生育进程推进而下降,并且沟垄集雨补灌处理下降速率低于平作各处理。抽穗期 CK 显著低于除 T4 以外的其他各处理 ($P < 0.05$)。扬花期 qP 以 T2、T3、T6 显著高于其它处理 ($P < 0.05$),平作灌水处理 T7 也显著高于 CK ($P < 0.05$)。灌浆期 T3 显著高于其它处理 ($P < 0.05$),沟垄集雨处理和平作处理均表现为灌水 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理显著高于不灌和灌水 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 ($P < 0.05$)。生育期 qP 平均值依次为 $T3 > T2 > T6 > T5 > T7 > T1 > T4 > CK$ 。T7 比 CK 提高了 11.0%,差异极显著 ($P < 0.01$)。T2、T3、T5、T6 分别比 T7 增加了 7.6%、8.9%、1.9%、4.2%,除 T5 差异显著外 ($P < 0.05$),其余均达极显著水平 ($P < 0.01$)。T1 分别比 T4、CK 提高了 2.3%、9.8%,与后者差异极显著 ($P < 0.01$)。以

上表明集雨处理较平作处理可显著增加光化学淬灭系数 qP 。沟垄集雨种植处理不灌溉、补灌 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 或灌溉 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 qP 值均比平作种植相同灌水量处理高,保持较高的 PS II 反应中心开放

数目,表明沟垄集雨种植增强了冬小麦 PS II 光合电子传递活性,减少 PS II 氧化侧向 PS II 反应中心的电子流动抑制,补灌加强了集雨处理的效果,并且 60 cm 沟垄集雨处理效果优于 40 cm 沟垄集雨处理。

表 4 不同处理对冬小麦各生育期 qP 和 qN 的影响
Table 4 Effects of qP and qN at different growth stages under different treatments

处理 Treatments	qP				qN			
	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	平均 Average	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	平均 Average
T1	0.94a	0.86bc	0.77d	0.86de	0.21ab	0.26b	0.34bc	0.27bc
T2	0.96a	0.96a	0.884ab	0.93a	0.19b	0.22c	0.29c	0.23cde
T3	0.96a	0.96a	0.92a	0.95a	0.19b	0.2c	0.23d	0.21e
T4	0.90ab	0.84cd	0.78d	0.84e	0.22ab	0.28ab	0.38b	0.29ab
T5	0.93a	0.89b	0.83c	0.88bc	0.2ab	0.24bc	0.31bc	0.25cd
T6	0.95a	0.90a	0.87b	0.90b	0.19b	0.21c	0.25d	0.22de
T7	0.94a	0.89b	0.77d	0.87cd	0.21ab	0.25bc	0.35bc	0.27bc
CK	0.84b	0.81d	0.7e	0.78f	0.25a	0.32a	0.41a	0.33a

随生育进程推进,各处理的非光化学淬灭系数 qN 均呈增加趋势。抽穗期各处理 qN 值差异不大,CK 显著高于 T2、T3、T6 ($P < 0.05$),与 T7、其他沟垄集雨处理差异不显著。扬花期 T3 和 T6 显著低于 T1、T4、CK,CK 显著高于 T7 ($P < 0.05$)。灌浆期 CK 显著高于其他各处理,沟垄集雨各处理随补灌量增加 qN 降低,补灌 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 显著低于补灌 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和不灌处理 ($P < 0.05$),沟垄集雨补灌 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理显著低于平作灌水 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 ($P < 0.05$)。生育期 qN 平均值依次为 CK > T4 > T1 = T7 > T5 > T2 > T6 > T3, T1、T4、T7 分别比 CK 降低 21.0%、11.4%、21.0% ($P < 0.05$)。T2、T3、T5、T6 分别比 T7 降低了 15.7%、30.6% ($P < 0.01$)、8.0%、24.6%,差异显著 ($P < 0.05$)。表明 CK 在水分胁迫下增加热耗散来避免类囊体膜被过度激发;沟垄集雨种植能更多地利用所吸收的光能,补充灌溉能减少环境对冬小麦生长中后期的胁迫。

2.5 不同处理产量对比

沟垄集雨各处理产量均显著高于 CK ($P < 0.05$) (图 3),产量提高幅度 74.6% ~ 124.9%。平作灌水处理 T7 ($6\,589.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 比 CK ($3\,483.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 增产 89.1% ($P < 0.01$)。不同宽度的沟垄集雨处理均表现出随补灌量增加而产量增加,补灌 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理和不灌水处理无显著差异,均显著低于沟垄集雨补灌 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 ($P < 0.05$),60 cm 沟垄集雨处理产量显著高于相同补灌水平下的 40 cm 沟垄集雨处理产量。T1 ($6\,771.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 产量比 T4 ($6\,083.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 增加了 11.3% ($P <$

0.05),比 CK 增产 94.3% ($P < 0.01$),T2 ($7\,222.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 比 T5 ($6\,572.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、T7 增产 9.9%、9.6% ($P < 0.05$),T3 ($7\,833.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 比 T6 ($7\,198.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 增产 8.8% ($P < 0.05$),比 T7 产量提高了 18.9% ($P < 0.01$)。

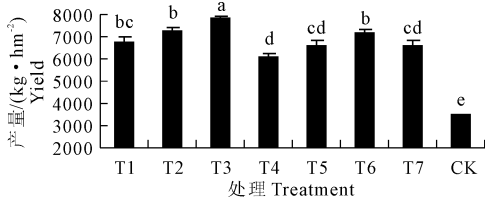


图 3 不同处理下冬小麦的籽粒产量
Fig.3 The grain yield of different treatments

3 结论与讨论

水分胁迫使作物叶片光合能力降低^[21]。已有研究表明^[3,8],沟垄集雨种植方式可以显著提高作物光合效率。在本试验中,沟垄集雨处理的冬小麦旗叶净光合速率 (P_n) 在各生育时期均显著高于平作处理,灌浆期 60 cm 沟垄集雨处理显著高于平作灌水处理的净光合速率 ($P < 0.05$),而 40 cm 沟垄集雨处理的净光合速率与平作灌水差异不显著,这与产量结果表现基本一致。

植物体内发出的叶绿素荧光信号比净光合速率 (P_n) 更能反映光合作用的真实行为^[8]。本试验叶绿素荧光参数变化与净光合速率表现基本一致。许大全等^[22]认为 F_o 的减少表明天线色素的热耗散增加。徐心志等^[15]研究发现初始荧光 F_o 随灌水次数

增加而降低, Fv/Fm 随灌水量减少而减少, 本研究结果发现平作处理 Fo 、 Fv/Fm 值均低于沟垄集雨处理, 说明沟垄集雨处理较平作处理更多地利用了植株吸收的光能。研究认为^[20,23], 水分胁迫下旗叶荧光参数 Fv/Fm 、 Fv/Fo 、 qP 均降低, 灌水可以促使 PS II 反应中心开放部分的比例增加, 促进 PS II 反应中心的电荷分离, 从而提高了 PS II 的电子传递能力, 最终有利于 PS II 量子产额的提高。任小龙等^[3]也在模拟降雨试验中发现在 230 mm 和 340 mm 雨量下, 平作处理的 Fv/Fm 、 Fv/Fo 和 qP 在各生育时期均小于集雨处理。本研究发现沟垄集雨处理 Fo 、 Fm 、 Fv 、 Fv/Fm 、 Fv/Fo 、 qP 高于平作处理, 与前人研究结果相近, 表明沟垄集雨种植结合补灌栽培处理能促进冬小麦叶片利用光能, 显著提高光能的转化效率及其量子产额, 进而为光合碳同化提供充足的还原力。说明沟垄集雨种植补灌能够缓解生育中后期水分等逆境对冬小麦的生长胁迫。

良好的栽培技术和环境条件可以改善耕层土壤水肥状况, 利于产量形成。已有大量研究^[3-7]得出沟垄集雨种植可以提高作物产量。本研究表明沟垄集雨种植可使冬小麦籽粒产量大幅提高。集雨处理较平作不灌水处理 (CK) 增产 74.6% ~ 124.9%, 集雨补灌处理较平作灌水处理增产 0.3% ~ 18.9%, 宽垄沟集雨种植增产效果优于窄垄沟, 这与寇江涛等^[9]在苜蓿上所得结果相近。而与王俊鹏等^[24]在宁南旱区试验得出的窄带型增产效果优于宽带型结论相反, 这可能与补灌效应、降水量和供试作物有关, 因此在不同降雨年型下宽、窄沟垄集雨种植补灌的增产节水效果还有待进一步验证。

参 考 文 献:

[1] 吴普特, 冯 浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 152-157.

[2] 蔺海明, 牛俊义, 秦舒浩. 陇中半干旱区小麦和玉米补灌效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 80-86.

[3] 莫 非, 周 宏, 王建永, 等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1-17.

[4] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 半干旱区沟垄集雨对玉米光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 838-845.

[5] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 夏玉米沟垄覆盖集水效果及生态效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 28-31.

[6] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvest-

ing system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.

[7] 李 儒, 崔荣美, 贾志宽, 等. 不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3312-3322.

[8] 秦舒浩, 张俊莲, 王 蒂, 等. 半干旱雨养农业区集雨补灌对马铃薯田水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 179-182.

[9] 丁瑞霞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区微集水种植条件下谷子边际效应和生理特性的响应[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 494-501.

[10] 寇江涛, 师尚礼, 王 琦, 等. 垄沟集雨对紫花苜蓿草地土壤水分、容重和孔隙度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1336-1342.

[11] 胡廷积, 杨永光, 马元喜, 等. 小麦生态与生产技术[M]. 郑州: 河南科技出版社, 1986: 19-23.

[12] 尹光华, 刘作新, 陈温福, 等. 水肥耦合条件下春小麦叶片的光合作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 40-43.

[13] Genty B, Harbinson J, Briantais JM, et al. The relationship between non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence and the rate of photosystem 2 photochemistry in leaves[J]. Photosynth Res, 1990, 25(3): 249-257.

[14] 姜东燕, 于振文. 不同灌溉量对冬小麦旗叶叶绿素荧光特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18003-18004, 18010.

[15] 徐心志, 马 超, 孙 倩, 等. 不同灌水量对黄淮海地区冬小麦叶绿素荧光及光保护特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 183-190.

[16] 肖俊夫, 刘战东, 刘祖贵, 等. 不同灌水次数对夏玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(2): 36-40.

[17] 李友军, 吴金芝, 黄 明, 等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 44-48.

[18] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.

[19] Lichtenthaler H K. Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

[20] 王可玢, 许春辉, 赵福洪, 等. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 生物物理学报, 1997, 13(2): 123-128.

[21] 陈 军, 戴俊英. 干旱对不同耐性玉米品种光合作用及产量的影响[J]. 作物学报, 1996, 22(6): 757-762, 774.

[22] 许大全, 张玉忠, 张荣铤. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 237-243.

[23] 张秋英, 李发东, 刘孟雨, 等. 不同水分条件下小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数与子粒灌浆速率[J]. 华北农学报, 2003, (1): 26-28.

[24] 王俊鹏, 蒋 骏, 韩清芳, 等. 宁南半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 8-13.