

秸秆还田下水肥管理模式对冬小麦气体交换参数及产量的影响

何春霖¹, 郭丽丽², 王利书^{1*}, 范晓懂¹, 程东娟¹, 李菲³, 张茜茜¹, 刘娜¹, 郑云普¹

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探讨秸秆还田下冬小麦气体交换参数及产量对水肥处理的响应,通过大田试验研究了秸秆还田下灌水时期、施肥时期、灌水量和施肥量对冬小麦气体交换过程及产量构成的影响。研究表明:在抽穗期和灌浆期,无论增加灌水量还是减少灌水量均导致冬小麦叶片净光合速率上升;减少灌水量明显提高抽穗期叶片水平上的水分利用效率,但随着灌水量的增加,千粒重反而降低。抽穗期和成熟期的越冬水+拔节水+扬花水处理增加叶片净光合速率,且提高水分利用效率和千粒重。与对照相比,施肥处理叶片净光合速率呈现出增加的趋势,但增加幅度并不显著。在生长初期(拔节期+抽穗期)减少施肥量,光合速率增加;越冬期施肥较多、拔节期施肥较少(S3S1)的处理下,冬小麦的千粒重增加。本研究结果将为黄淮海平原粮食产区冬小麦水肥管理措施和政策的制定提供数据支撑和理论依据。

关键词:秸秆还田;冬小麦;气体交换参数;产量构成

中图分类号:S512.1¹

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2021)05-0040-07

Effects of Water and Fertilizer Management Mode under Straw Returning on Gas Exchange Parameters and Yield of Winter Wheat

HE Chunlin¹, GUO Lili², WANG Lishu^{1*}, FAN Xiaodong¹, CHENG Dongjuan¹, LI Fei³, ZHANG Xixi¹, LIU Na¹, ZHENG Yunpu¹

(1. School of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038; 2. Key laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081; 3. School of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forest University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to investigate the response of gas exchange parameters and yield of winter wheat under straw returning to water and fertilizer treatment, the effects of irrigation period, fertilization period, irrigation amount and fertilizer amount on gas exchange process and yield composition of winter wheat under straw returning were studied through field experiments. The results showed that: At heading stage and filling stage, the net photosynthetic rate of winter wheat leaves increased whether the irrigation amount increased or decreased. In addition, reducing the irrigation amount significantly increased the WUE at the heading stage, but the 1000-grain weight decreased with the increase of irrigation amount. The treatment of overwintering water + jointing water + flowering water increased the net photosynthetic rate of leaves at heading stage and mature stage, and increased the water use efficiency and 1000-grain weight. Compared with the control group, the net photosynthetic rate of leaves under fertilization showed an increasing trend, but the increase was not significant. At the early growth stage (jointing stage + heading stage), the photosynthetic rate increased with the decrease of fertilizer application. The 1000-grain weight of winter wheat increased under the treatment of more fertilization and less fertilization (S3S1) in the overwinter period. The results of

收稿日期:2019-05-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300905);河北省自然科学基金面上项目(E2019402468);河北省研究生创新能力资助项目(CXZZSS2020082)

作者简介:何春霖(1996-),男,在读硕士,从事作物生理生态学研究。

通讯作者:王利书,女,博士,副教授,E-mail: fc8232@126.com

this study will provide data support and theoretical basis for the formulation of water and fertilizer management measures and policies for winter wheat in grain producing areas of the Huang-huai-hai Plain.

Key words: Straw returning; Winter wheat; Gas exchange parameters; Yield components

冬小麦作为中国北方地区普遍种植的关键粮食作物,在黄淮海平原区的播种面积占全国的33%,产量占全国的70%^[1]。然而,黄淮海平原区在冬小麦生长关键期的降水量较少,水资源相对紧缺,灌溉用水严重不足^[2-4]。地下水压采使农业用水问题更加紧张,合理的农业节水灌溉措施不仅可以减少对现有水资源的消耗,缓解水资源短缺问题,而且可以提高作物产量^[5-6]。土壤养分状况也是阻碍农作物增产的主要因素之一^[7]。众所周知,施肥是改善土壤养分供给的主要途径,但过量或不合理的化肥施用方式,会造成土壤肥力下降^[3],导致土壤环境遭受严重污染^[8]。秸秆作为一种易于回收利用的可再生能源,对扩展肥料来源和改善农田生态系统小环境有积极作用^[4]。大量研究发现,秸秆还田可以增加土壤有机碳和氮含量,满足作物生长所需要的氮、磷和钾等营养元素,对作物生长和产量提升具有积极作用^[5]。然而,长期机械耕作和秸秆还田会造成土壤性质发生变化,由于作物对各种营养元素的吸收过程紧密联系,这可能影响作物对营养元素的吸收过程和利用效率^[9]。采取合理的灌溉和施肥措施可以显著改善作物生长发育的水肥条件,从而提高作物的初级生产力和粮食产量。

农作物的干物质主要来自光合作用,其产量在很大程度上由其光合性能决定^[10-11]。光合作用是一个复杂的生理生化过程,对外界环境变化响应非常敏感^[12-13]。相关研究表明,水分对作物光合效率的影响主要通过气孔限制和非气孔限制^[14]。施肥则主要通过非气孔限制影响光合反应速率,即通过氮素含量的变化影响光合酶活性和叶绿素含量,过少或过量的氮肥都会降低叶片光合反应速率^[15]。目前,秸秆还田下灌溉制度和施肥制度对作物叶片气体交换参数的研究相对较少,大多数研究主要集中在在水肥对土壤营养元素的变化和作物产量的影响。本研究以黄淮海平原农作物冬小麦为研究对象,通过分析秸秆还田下水肥管理模式对冬小麦气体交换参数和产量的影响,在确保冬小麦增产的前提下,为提高秸秆还田土壤的水肥利用效率,缓解农业用水紧张、改善农田土壤环境提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试验设计

试验地位于河北省邢台市宁晋县原种场(北纬37°24'50",东经114°45'52",海拔25 m),位于黄淮海平原中部,暖温带大陆性气候区,属半湿润气候。该研究区年平均气温13℃,年平均降水量501 mm,试验地土壤质地以壤土和黏土为主。

选用小麦品种“济麦22”,试验包含灌水量和灌水时期两个因素,灌水量为420 m³/hm²(W1)、525 m³/hm²(W2)、630 m³/hm²(W3)3个水平,灌水量525 m³/hm²为对照,灌水时期处理分别为越冬水+拔节水(T1)、越冬水+拔节水+扬花水(T2)、越冬水+拔节水+扬花水+麦黄水(T3),灌水量和灌水时期相结合,一共5个处理分别为W1T1、W2T1、W3T1、W2T2、W2T3,每个处理重复3次。小区面积16 m×12 m=192 m²,小区间距0.5 m。

本试验包含施肥量和施肥时期两个因素。施肥量设置240 kg/hm²(S1)、300 kg/hm²(S2)、360 kg/hm²(S3)3个水平,以施肥量300 kg/hm²为对照,在播种翻地施肥和返青追肥两个时期进行施肥处理,并监测不同时期施肥量对各个参数的影响,共设置5个处理即S1S1、S2S2、S3S3、S3S1、S1S3,每个处理重复3次(表1)。

表1 秸秆还田下冬小麦肥料管理模式

处理	施肥量(kg/hm ²)		灌水时期
	播种翻施	返青追施	
S1S1	240	240	越冬水、拔节水
S2S2	300	300	越冬水、拔节水
S3S3	360	360	越冬水、拔节水
S3S1	360	240	越冬水、拔节水
S1S3	240	360	越冬水、拔节水

1.2 测定指标及方法

1.2.1 气体交换参数测定

利用Li-6400便携式光合测定系统测定冬小麦的气体交换参数,即叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。同Li-6400便携式光合测定系统配套使用的2 cm×3 cm标准气室可以独立控制光合光量子通量密度(PPFD)、CO₂浓度、叶片温度以及气室湿度。测量气体交换参

数时设定叶室内PPFD为 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, CO_2 浓度为 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 叶片温度为所测当天气温, 气室相对湿度控制为50%~60%。此外, 叶片尺度上的水分利用效率(WUE)用公式 $WUE = Pn/Tr$ 计算。

1.2.2 冬小麦穗粒数和千粒重测定

在小麦收获时, 每个小区选30株小麦, 调查每株小麦的穗粒数, 使用百粒法测定种子重量, 随机取10次称重, 即为千粒重。

1.3 统计分析

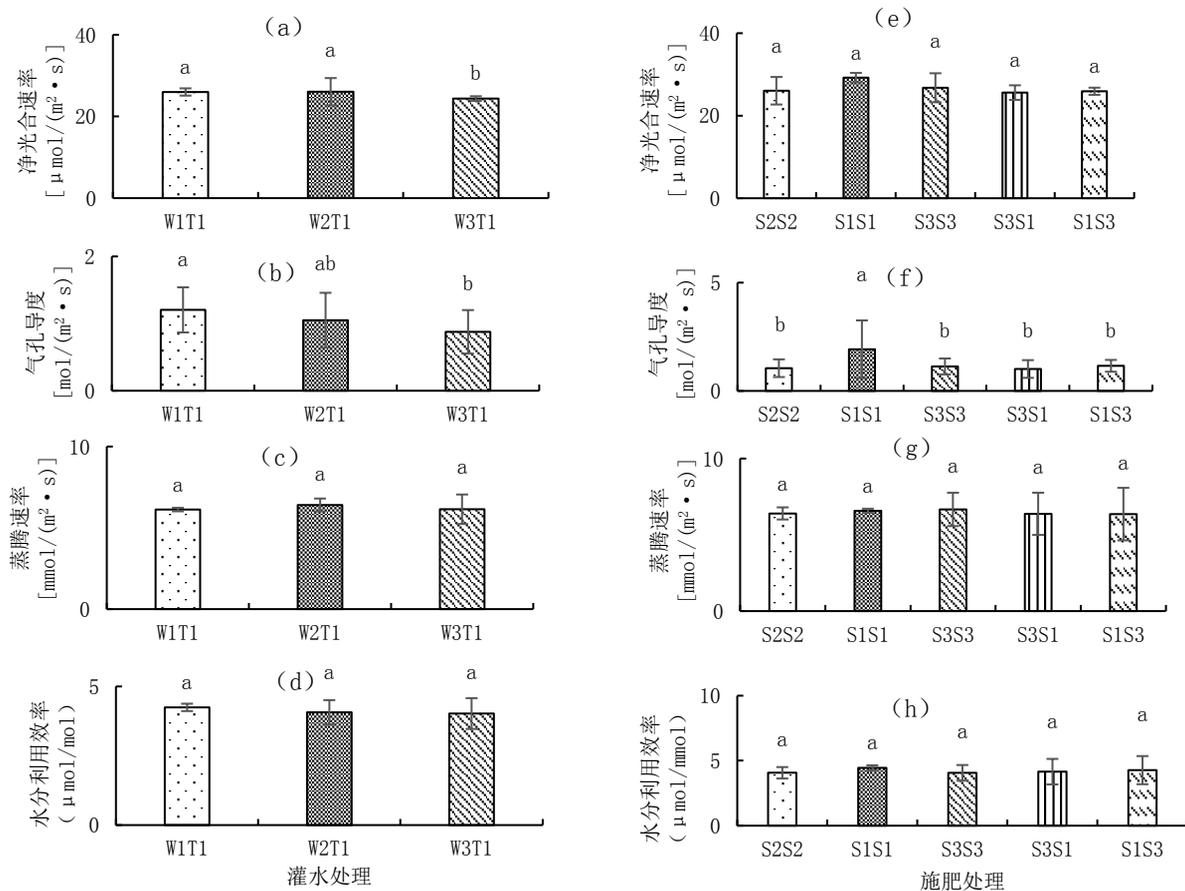
秸秆还田下水肥处理对冬小麦产生影响的各个指标利用单因素(不同水肥管理模式)的统计方法, 并使用Duncan's Multiple Range Test比较不

同处理间的显著性差异($P < 0.05$)。本研究的统计分析均利用SPSS 13.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田下灌水和施肥对冬小麦拔节期气体交换参数的影响

与对照W2T1相比, W1T1对拔节期叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)未产生显著影响($P > 0.05$); W3T1使拔节期 P_n 显著下降($P < 0.05$), 但对 G_s 、 T_r 和WUE未产生显著影响($P > 0.05$)。S2S2显著增加拔节期 G_s ($P < 0.05$), S3S3导致拔节期 G_s 显著下降(图1)。



注: 所有数据的平均值利用单因素方差分析在0.05水平上进行比较。不同小写字母表示在0.05水平上差异显著, 相同小写字母表示在0.05水平上差异不显著, 下同

图1 秸秆还田下灌水和施肥模式对冬小麦拔节期气体交换参数的影响

2.2 秸秆还田下灌水和施肥对冬小麦抽穗期气体交换参数的影响

在抽穗期W1T1和W3T1对 P_n 、 G_s 和 T_r 均无显著影响; 但W1T1显著增加了WUE ($P < 0.05$)。与对照相比, W2T2导致抽穗期 P_n 、 G_s 和WUE降低, 但降低幅度不显著 ($P > 0.05$)。S2S2增加了抽穗期 P_n 和 G_s , 但差异不显著 ($P > 0.05$) (图2)。

2.3 秸秆还田下灌水和施肥对冬小麦灌浆期气体交换参数的影响

在灌浆期W1T1和W3T1对 P_n 和 T_r 未产生显著影响 ($P > 0.05$), 但 G_s 显著增加 ($P < 0.05$)。W2T2对冬小麦气体交换参数未产生显著影响 ($P > 0.05$)。S2S2和S3S3均使 G_s 显著降低 ($P < 0.05$), 未对 P_n 、 T_r 和WUE产生显著影响 ($P > 0.05$) (图3)。

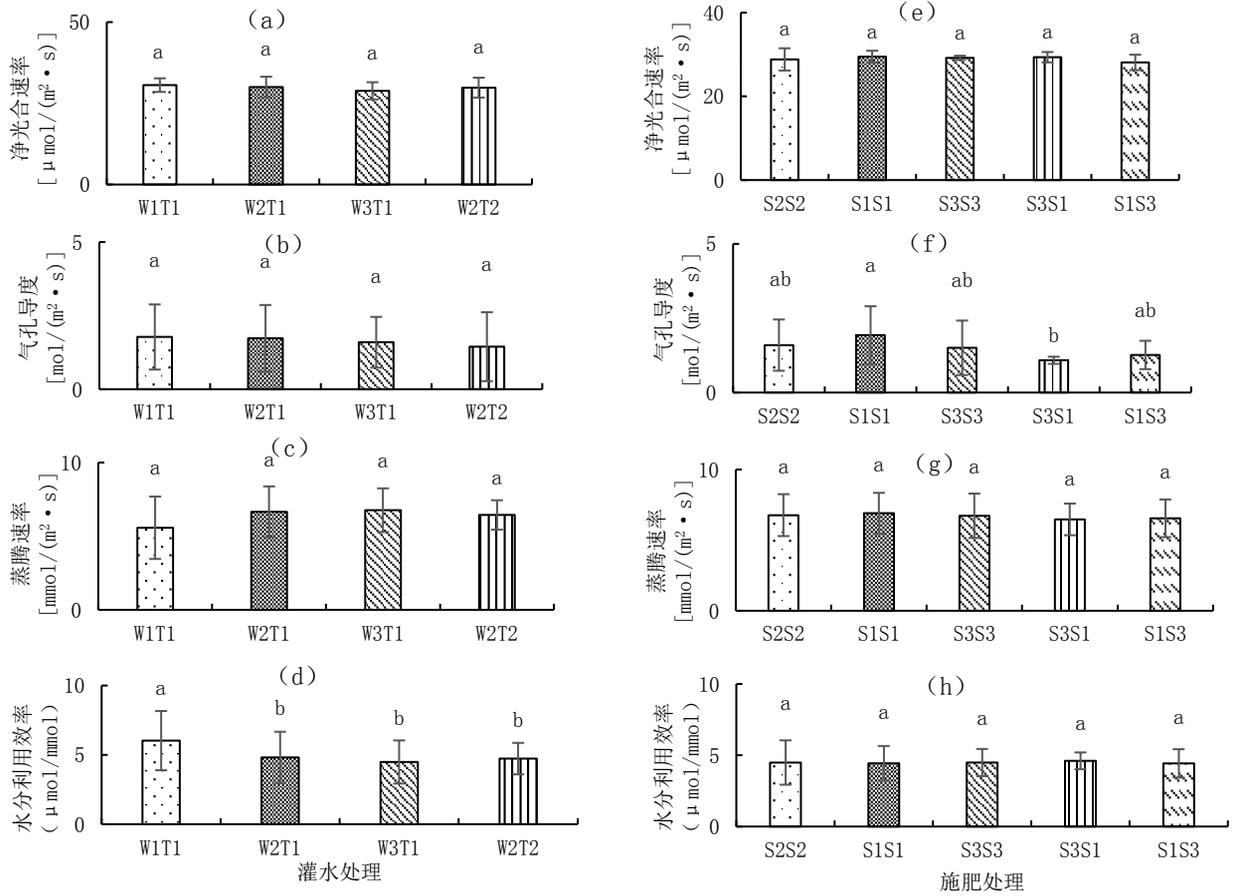


图2 秸秆还田下灌水和施肥模式对冬小麦抽穗期气体交换参数的影响

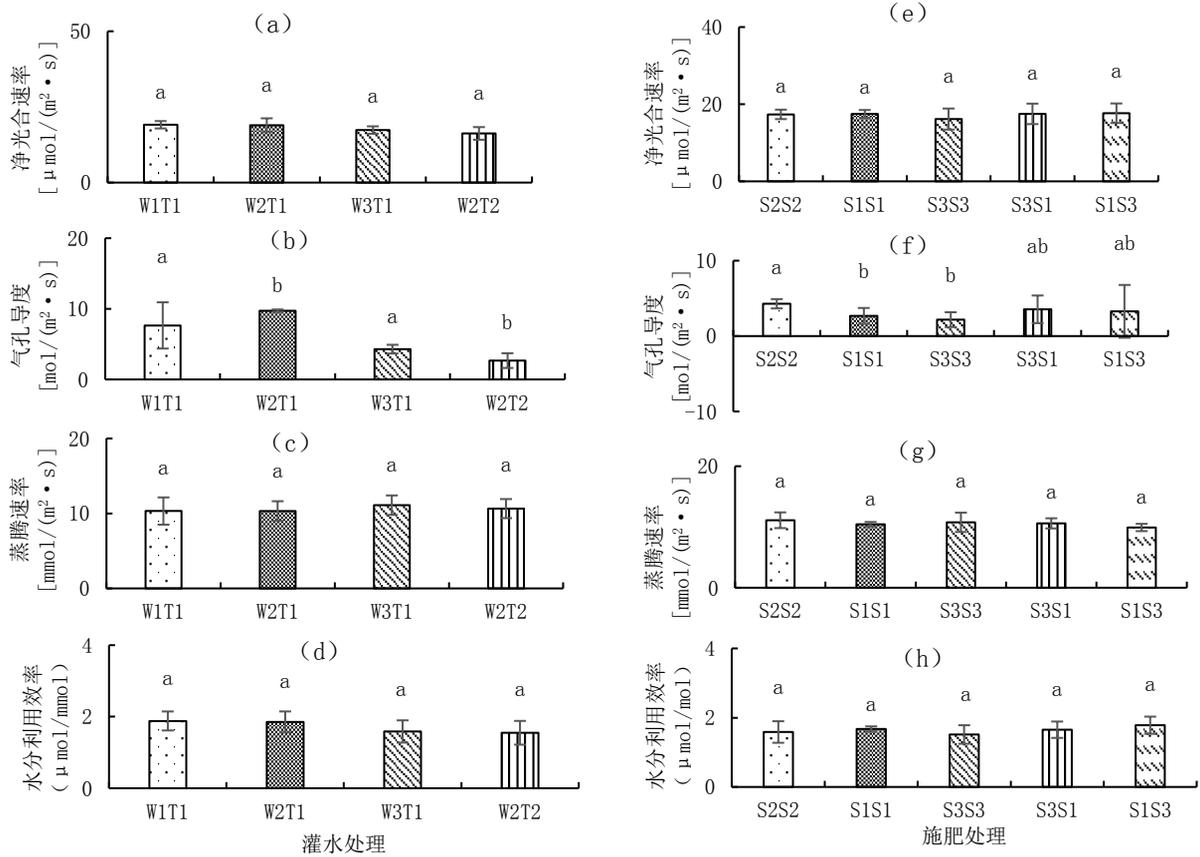


图3 秸秆还田下灌水和施肥模式对冬小麦灌浆期气体交换参数的影响

2.4 秸秆还田下灌水和施肥对冬小麦成熟期气体交换参数的影响

成熟期 W2T2 对冬小麦气体交换参数未产生显著影响 ($P>0.05$)。W2T3 显著增加了 Pn, 但对

Gs、Tr 和 WUE 均未产生显著影响 ($P>0.05$)。S2S2 导致 Pn、Gs 和 Tr 增加未产生显著影响 ($P>0.05$), 而 S1S3 显著增加了 Gs, 但导致 WUE 显著下降 ($P<0.05$) (图 4)。

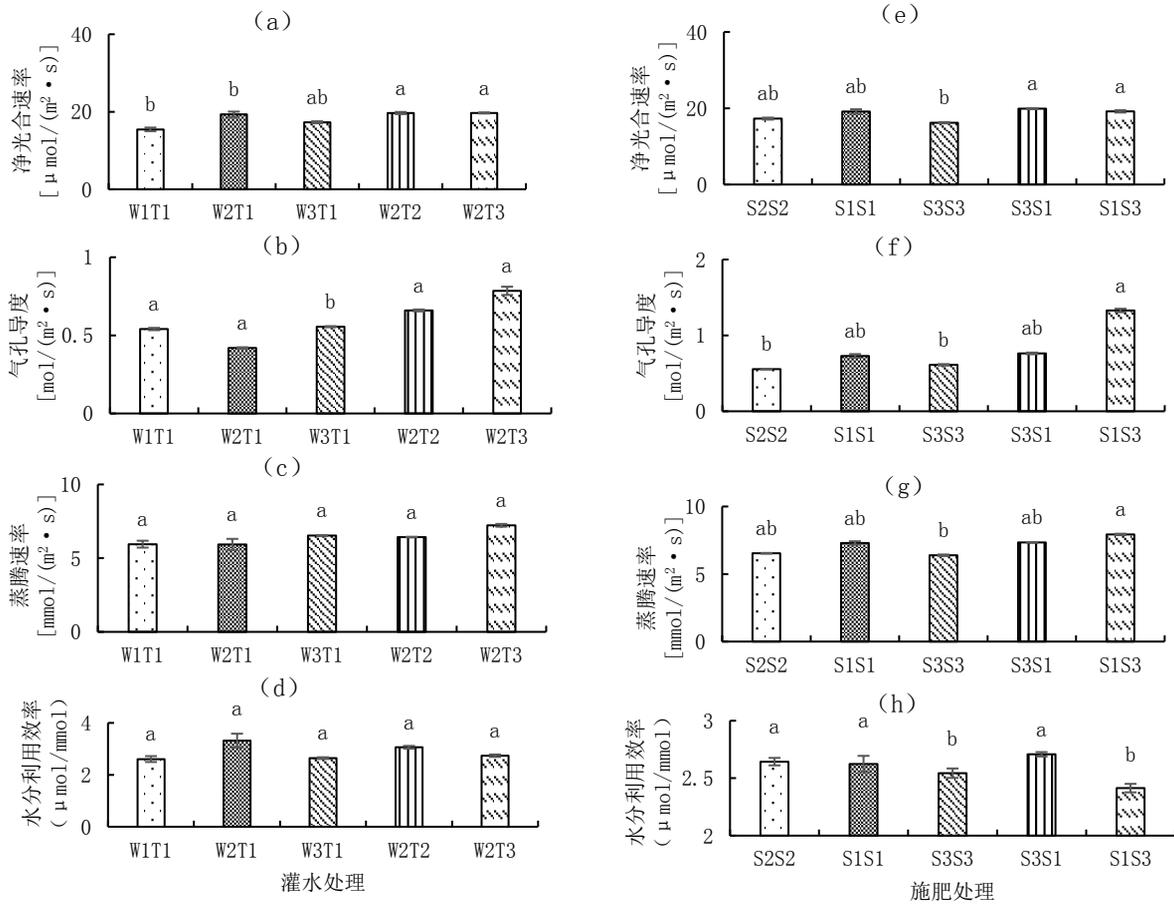


图 4 秸秆还田下灌水和施肥模式对冬小麦成熟期气体交换参数的影响

2.5 秸秆还田下灌水和施肥对冬小麦产量构成的影响

由图 5 可知, 与对照 W2T1 相比, 灌水处理对

穗粒数均没有产生显著影响 ($P>0.05$)。W3T1 导致千粒重下降, 但并不显著 ($P>0.05$), W2T2 和 W2T3 对千粒重未产生显著影响 ($P>0.05$)。

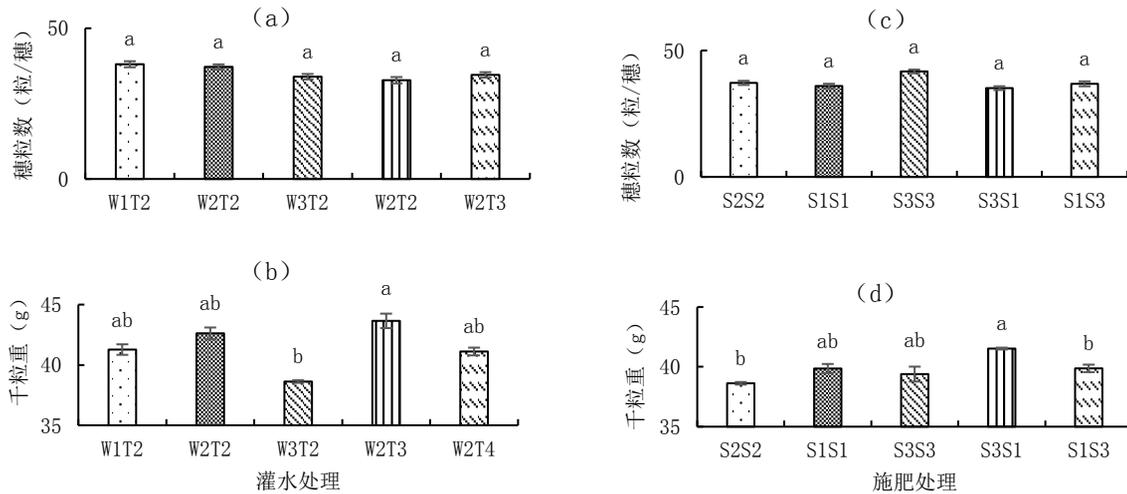


图 5 秸秆还田下灌水和施肥模式对冬小麦产量构成的影响

与对照 S2S2 相比,施肥处理均未对冬小麦穗粒数产生显著影响 ($P>0.05$)。S1S1 和 S3S3 降低了冬小麦千粒重,但降低幅度并不显著 ($P>0.05$)。S3S3 导致冬小麦穗粒数和千粒重呈现增加的趋势,但没有达到显著水平 ($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 秸秆还田下灌水处理对冬小麦的影响

研究表明,合理的灌溉时间、灌溉次数和灌水量对小麦产量和水分利用效率具有促进作用^[16]。在黄淮海平原冬小麦谷粒填充阶段减少灌溉次数,将导致叶绿素含量减少、叶绿体内同光合作用相关的生理生化过程减缓,进而导致减产^[17]。在冬小麦生长时期灌水可增加有效穗数,谷粒填充时期灌水可提高小麦质量和重量^[18-19]。在黄淮海粮食产区实施优化的灌溉模式,可以达到节水和粮食增产的双重效益^[20-21]。本研究结果显示,穗粒数随灌水量增加逐渐下降,而灌水时期对穗粒数没有影响,千粒重在 W2T2 处理下最高,表明灌水 3 次对冬小麦的增产效益最高。灌浆期 Gs 在 W3T1 处理下增大,表明冬小麦可以通过调整气孔导度缓解水分过多的压力,灌溉对小麦不同生长阶段的叶片气孔导度影响较大,因为灌水次数的减少会导致气孔导度减小^[22]。

灌水对光合速率和营养物质的吸收有显著影响^[23-24]。本研究发现,拔节期的 Pn 随灌水量的增加呈现先增加后降低的现象,但在抽穗期和灌浆期, W2T1 处理导致 Pn 降低,且在成熟期 Pn 随灌水量的增加而升高,这可能是由于土壤营养元素的减少造成的,因为秸秆覆盖在前期可能会降低土壤中营养元素的含量^[16]。

3.2 秸秆还田下施肥处理对冬小麦的影响

氮素是农作物生产力的主要限制性营养素之一,农田生态系统的初级生产力很大程度上取决于土壤的氮肥水平^[25]。土壤中 N 含量较低时会限制作物发育过程,导致作物生长缓慢,进而减少粮食产量^[26]。过量施氮也会导致农作物产量下降,因为过多的氮会导致叶片 Pn 下降,进而降低氮素向穗部籽粒的运转效率^[27]。在作物不同生长阶段的施肥以及数量对作物生产力也有显著影响^[28]。拔节期是整个生长发育的关键阶段,在该时期适当追施氮肥可以提高小麦的形态特征参数,提高碳同化效率,增加干物质累积量^[29]。并非所有的施肥量与产量之间均成正比关系^[30]。本研究结果显示, S3S1 增加了灌浆期的穗重和干重,

进而提高了千粒重,表明在越冬期增加肥料,而后在拔节期追施少量的氮肥能够增加穗粒重; S3S3 增加了穗粒数,说明在播种期和拔节期增肥可以增加小麦产量。

光合作用是产量形成的基础,其过程受着氮的调控^[31]。氮肥过多导致磷和钾含量失调,减少光合作用^[32]。近年来,大量研究发现作物秸秆富含丰富的营养物质,可以满足作物生长需求,其和无机肥配施可以提高作物产量,并减少氮肥的浪费和环境污染^[25]。李国田^[33]发现秸秆还田下不增施氮肥导致小麦长势和产量下降,因为在秸秆还田初期微生物分解秸秆时会与作物竞争土壤中的速效氮,导致作物生长受到氮限制。另外一些研究发现,与秸秆还田相关的粮食产量增幅没有显著下降,特别是在没有施用氮肥的情况下^[34]。Qin 等^[35]得出结论,塑料和秸秆覆盖都大大提高了作物生产力, WUE 和氮素利用效率 (NUE), 然而秸秆覆盖的影响很大程度上取决于水分和氮素的输入水平和气温,对土壤有机质含量的敏感性较低。本研究结果表明, S3S3 并没有增加 Pn, 这表明光合速率的降低是由于元素的缺乏,可能是因为随着施肥量的增加,导致其他元素的比例失调,进而减少了作物吸收的营养。因此,应该在秸秆还田下控制好作物所需要的营养元素间的比例关系,从而提高作物生产力。

4 结论

4.1 灌水量为 $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、灌水时期为越冬水+拔节水+扬花水+麦黄水的水肥管理措施下冬小麦的净光合反应速率和水分利用效率最高。

4.2 不同的灌水处理对小麦穗粒数未能产生显著影响,但应避免越冬水+拔节水灌水过多。在播种翻施的施肥量为 $360 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、返青追施的施肥量为 $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的处理下,冬小麦具有较高的净光合速率、水分利用效率和千粒重。

4.3 在秸秆还田条件下,黄淮海冬小麦最佳灌水时期为越冬水+拔节水+扬花水+麦黄水、灌水量为 $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、播种翻施的施肥量为 $360 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、返青追施的施肥量为 $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

- [1] 胡实,莫兴国,林忠辉.冬小麦种植区域的可能变化对黄淮海地区农业水资源盈亏的影响[J].地理研究,2017,36(5):861-871.
- [2] 屈宝香,周旭英,张华.黄淮海地区种植业结构调整与水资源关系研究[J].中国农业资源与区划,2003,24(5):29-32.

- [3] 董一漩,屠乃美,魏 征,等.施肥模式对不同基础地力稻田培肥和水稻产量的动态影响[J].东北农业科学,2019,44(2):13-18,33.
- [4] 王宁堂,王军利,李建国.农作物秸秆综合利用现状、途径及对策[J].陕西农业科学,2007(2):112-115.
- [5] Nguyen T L T, Hermansen J E, Mogensen L. Environmental performance of crop residues as an energy source for electricity production: The case of wheat straw in Denmark[J]. Applied Energy, 2013, 104: 633-641.
- [6] Kang S Z, Zhang F C, Hu X T, et al. Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water[J]. Plant Soil, 2002, 238: 69-77.
- [7] 梅旭荣,康绍忠,于 强,等.协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J].中国农业科学,2013,46(6):1149-1157.
- [8] 王 旭,李贞宇,马文奇,等.中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J].中国农业科学,2010,43(12):2469-2476.
- [9] 王增春,刘胜环,黄少华.麦草全量还田稻作氮肥运筹研究[J].江苏农业科学,2007(6):44-47.
- [10] 杨 阳,苍 晶,王学东,等.大豆豆荚光合特性及其对产量的贡献[J].东北农业大学学报,2008,39(12):51-56.
- [11] Zou X X, Ma Y Q, Liu R Y, et al. Combining ability analyses of net photosynthesis rate in pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(2): 159-166.
- [12] 郑云普,徐 明,王建树,等.玉米叶片气孔特征及气体交换过程对气候变暖的响应[J].作物学报,2015,41(4):601-612.
- [13] Xu M. The optimal atmospheric CO₂ concentration for the growth of winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 184: 89-97.
- [14] Hugh J E. Stomatal and non-stomatal restrictions to carbon assimilation in soybean (*Glycine max*) lines differing in water use efficiency[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48(3): 237-246.
- [15] 周汉章,刘 环,刘 斐,等.播量与水肥耦合对秋闲田饲用谷子水分利用率的影响[J].农学学报,2015,5(12):27-38.
- [16] 王小燕,郑成岩,于振文,等.水氮互作对小麦土壤水分利用和茎中果聚糖含量的影响[J].应用生态学报,2009,20(8):1876-1882.
- [17] 徐心志,马 超,孙 倩,等.灌水对黄淮海冬小麦叶片光合特性的影响[J].麦类作物学报,2013,33(4):692-698.
- [18] 党建友,裴雪霞,张 晶,等.秸秆还田条件下灌水模式对冬小麦产量和水肥利用效率的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2511-2516.
- [19] 宁东峰,李志杰,孙文彦,等.节水灌溉对黄淮海地区冬小麦水分消耗与光合特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(4):852-858.
- [20] 王淑芬,张喜英,裴 冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(2):27-32.
- [21] 王德梅,于振文.灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J].应用生态学报,2008,19(9):1965-1970.
- [22] 成雪峰,张风云,柴守玺.春小麦对不同灌水处理的气孔反应及其影响因子[J].应用生态学报,2010,21(1):36-40.
- [23] 孟兆江,孙景生,段爱旺,等.调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型[J].农业工程学报,2010,26(1):18-23.
- [24] Walter Z L, Moril I. Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species[J]. Plant Production Science, 2005, 8: 454-460.
- [25] 宋明丹,李正鹏,冯 浩.不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J].农业工程学报,2016,32(2):119-126.
- [26] 杨文平,郝庆炉,胡喜巧,等.追氮时期对冬小麦品种矮抗58籽粒灌浆特性的影响[J].吉林农业科学,2009,34(6):51-53.
- [27] 张满利,陈 盈,隋国民.氮肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J].中国农学通报,2010,26(13):230-234.
- [28] Zhang X Y, Qin W, Chen S Y, et al. Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades—A case study in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 47-54.
- [29] 薛志伟,杨春玲,郭海斌,等.不同水氮处理对冬小麦生长及产量的影响[J].安徽农业科学,2016,44(11):31-33.
- [30] 张丽妍,孟繁盛,李艳国,等.不同肥料、施肥水平及施用方法对玉米产量及经济效益的影响[J].吉林农业科学,2014,39(3):27-30.
- [31] 王晓峰,田霄鸿,陈自惠,等.不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J].应用生态学报,2009,20(5):1105-1111.
- [32] 葛 君,姜晓君.施氮量对小麦旗叶光合特性、SPAD值、籽粒产量及碳氮代谢的影响[J].天津农业科学,2019,25(3):1-4.
- [33] 李国田.玉米秸秆还田条件下小麦栽培及施肥技术[J].农业与技术,2018,38(24):22-23.
- [34] Liu S X, Mo X G, Lin Z H, et al. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agriculture Water Management, 2010, 97: 1195-1209.
- [35] Qin W, Assinck F B T, Heinen M, et al. Water and nitrogen use efficiencies in citrus production: a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 222: 103-111.

(责任编辑:刘洪霞)