

# 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响

王磊, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌

(山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

**摘要:** 针对黄淮海地区农业生产中存在的水资源供应短缺, 肥料利用率低等问题, 设计试验研究水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响, 为黄淮海地区高效利用水氮资源提供理论依据。2015—2017 年以石麦 15(SM15)为材料, 利用水肥渗漏研究池, 设计 2 个供水量水平(500, 250 mm); 2 个施氮量水平(90, 180 kg/hm<sup>2</sup>); 2 个氮肥类型(无机肥尿素, 有机肥牛粪)。结果表明: 2 年试验内冬小麦旗叶光合生理特性变化规律相似, 各处理的冬小麦旗叶光合速率, 蒸腾速率, 单叶水分利用效率在生育期内均呈现先上升后下降的趋势。水氮互作对小麦旗叶光合速率影响显著, W1(供水量 500 mm)处理的旗叶光合速率明显高于 W2(供水量 250 mm)处理, 施氮肥 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理的旗叶光合速率明显高于施氮肥 90 kg/hm<sup>2</sup> 的处理, 与施用无机肥相比, 施用有机肥可保证冬小麦生育后期维持较高的旗叶光合速率。2 年试验干物质积累量最多、产量最高的处理为 W1M1(供水量 500 mm, 施有机氮肥 180 kg/hm<sup>2</sup>)。综合冬小麦光合生理特性, 籽粒产量, 本试验条件下有机肥增产效果优于无机肥, 冬小麦生育期供水量 500 mm, 施有机氮肥 180 kg/hm<sup>2</sup> 时冬小麦旗叶光合生理特性较优, 获得较高产量。

**关键词:** 水氮互作; 冬小麦; 光合生理特性; 干物质; 籽粒产量

**中图分类号:** S512.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)03-0301-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.045

## Effects of Water and Nitrogen Interaction on Physiological and Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat

WANG Lei, DONG Shuting, LIU Peng, ZHANG Jiwang, ZHAO Bin

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018)

**Abstract:** Water resource deficiency and low nitrogen use efficiency are very common in Huang Huai-Hai Plain (HHP). In order to deal with these problems, the experiment, using SM15 as the tested winter wheat cultivar, with different water supplies and nitrogen fertilizer combinations (two types of fertilizers, two application rates, two water supply levels), was carried out in the lysimeters in 2015—2017. The photosynthetic characteristics of all the treatments showed the same variation pattern: the flag leaf photosynthetic rate, transpiration rate and leaf water use efficiency (LWUE) increased firstly and then decreased. The flag leaf photosynthetic rate of W1 water supply quantity of 500 mm was significantly higher than that of W2 (water supply quantity of 250 mm), and the flag leaf photosynthetic rate of 180 kg/hm<sup>2</sup> was significantly higher than that of nitrogen application of 90 kg/hm<sup>2</sup>. Comparing with the application of inorganic fertilizers, the application of organic fertilizer could ensure the higher growth rate of flag leaf photosynthesis. The grain yield and dry matter accumulation in the W1M1 (water supply quantity of 500 mm and application of organic manure with about 180 kg/hm<sup>2</sup> treatment) were significantly higher than those in other treatments in the two growing seasons. According to the photosynthetic characteristics and grain yields of winter wheat, the experiment areas with organic fertilizers got higher yield and the rate of increasing production than those with inorganic. W1M1 was the best treatment, which had the highest yield and better photosynthetic characteristics.

**Keywords:** water and nitrogen interaction; winter wheat; photosynthetic and physiological characteristics; dry matter; grain yield

**收稿日期:** 2018-01-16

**资助项目:** 国家自然科学基金项目(31071358, 30871476); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAD07B06-2); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301001); 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-02-20); 山东省现代产业技术体系项目(SDAIT02-08); 山东省财政支持农业重大应用技术创新课题项目

**第一作者:** 王磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高产生理生态研究。E-mail: 18763825593@163.com

**通信作者:** 董树亭(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事玉米高产优质高效栽培生理研究。E-mail: stdong@sdau.edu.cn

黄淮海地区是国家粮食主产区,粮食产量占到全国粮食总产的三分之一,冬小麦—夏玉米轮作是该地区的主要种植模式,小麦作为我国北方第一大粮食作物,其产量稳定和高产高效在国家粮食安全中具有重要的战略地位<sup>[1]</sup>。近年来,黄淮海地区水资源供应紧张,过度施肥等问题日益突出。据统计,黄淮海地区水资源总量仅占全国的 20%,而人口总量达到全国的 41%,供需矛盾突出<sup>[2]</sup>,农业生产中小麦季施氮量普遍偏高,肥料利用率仅为 20%~40%<sup>[3]</sup>。如何协调水、肥资源投入与产量之间的矛盾已引起广泛重视。农业生产中只有水分和肥料投入协调,合理的水氮运筹才会产生明显的互作效应<sup>[4]</sup>,通过水氮互作调节作物光合生理特性,是实现作物高产的重要措施,适度减少水分供应不会降低作物光合速率,却显著减少作物蒸腾失水,从而提高单叶水分利用效率<sup>[5]</sup>。大量研究<sup>[6-8]</sup>表明,土壤中的水肥变化显著影响作物的光合作用及产量,李廷亮等<sup>[9]</sup>研究表明,施用氮肥促进小麦光合性能及产量提高。张珂珂等<sup>[10]</sup>的研究指出,水分亏缺显著降低冬小麦旗叶光合速率,生育后期适当灌溉显著提高光合性能,籽粒产量随之增加。Gu 等<sup>[11]</sup>研究表明,在缺水条件下增施氮肥,或者在肥力水平较低的土壤条件下增加供水量,通过水氮互作也可显著提高小麦干物质积累量,促进小麦增产。郭天财等<sup>[12]</sup>研究表明,适度减少施氮量和供水量,不会影响作物产量,水分和氮素利用效率却显著提高。关静<sup>[13]</sup>研究指出,合理灌溉与施肥,提高水分和肥料利用效率是北方地区水土控制措施中有待进一步研究和探讨的问题。目前有关施氮量、供水量及其互作效应的研究较多<sup>[14-15]</sup>,而肥料类型、施氮量、供水量 3 因素的互作研究较少。本试验从氮素和水分供应平衡入手,重点研究不同肥料类型下施氮量与供水量互作对冬小麦光合生理特性及产量的影响,旨在探讨提高籽粒产量途径,为黄淮海地区小麦种植中水分和氮肥的合理施用提供理论依据及技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2015—2017 年在山东农业大学黄淮海玉米技术创新中心(36°09' N,117°09' E)利用水肥渗漏研究池进行试验。试验地位于山东省中部,年平均气温 12.8℃,年降水量 700 mm,降水多集中于夏季,占 65%,冬季降水仅占 3.6%。2 年小麦生长季自然降水量分别为 110,120.8 mm。种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟制。土壤类型为棕壤土。每个渗漏池的长、宽、高分别为 2.5,2.5,2 m,池子由下向上依次装填 15 cm 粗砂,5 cm 细砂,180 cm 土壤,土壤取自附近农田,土壤类型为棕壤土。试验开始前各渗漏池理化性质基本一致,2015 年播种前 0—20 cm 土层有机质含量 11.21 g/kg,全氮 0.7 g/kg,速效磷 27.41 mg/kg,速效钾 92.01 mg/kg;2016 年播种前 0—20 cm 土层有机质含量 14.01 g/kg,全氮 1.21 g/kg,速效磷 26.92 mg/kg,速效钾 97.01 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置 2 个肥料类型、2 个施氮量、2 个供水量,8 个处理,3 次重复,共计 24 个水肥渗漏池,供试冬小麦品种为石麦 15(半冬性品种,生育期 250 d,成株株型紧凑,旗叶上冲,较抗倒伏,抗寒性好),种植基本苗为 240 万株/hm<sup>2</sup>,每个小区种植 12 行,行距 20 cm。2 个生长季播种及收获日期分别为 2015 年 10 月 10 号播种,2016 年 6 月 8 号收获;2016 年 10 月 10 号播种,2017 年 6 月 6 号收获。设置 2 种水分条件:生育期总供水量 500 mm(W1),250 mm(W2);W1 处理总水分投入量为 500 mm,除去自然降雨,2 个生长季实际灌溉量分别为 390,379.2 mm,W2 处理与 W1 灌溉时期相同,灌溉量减半,除去自然降雨,2 个生长季实际灌溉量分别为 147.5,129.2 mm。灌溉水源为地下水,灌溉时每个池子单独灌溉,灌溉方式为水表精确控制灌溉量。2015—2017 年具体灌溉情况见表 1。

表 1 冬小麦不同生育期的灌溉量

单位:mm

年份	处理	播种期	返青期	拔节期	开花期	开花—成熟	总灌溉量
2015—2016	W1	75.0	16.0	75.0	75.0	146.0	390.0
	W2	37.5	0	37.5	37.5	35.0	147.5
2016—2017	W1	75.0	0	75.0	75.0	154.2	379.2
	W2	37.5	0	37.5	37.5	16.7	129.2

注:播种期时间为 2015 年 10 月 10 日和 2016 年 10 月 10 日;返青期时间为 2016 年 3 月 5 日和 2017 年 3 月 6 日;拔节期时间为 2016 年 3 月 29 日和 2017 年 4 月 1 日;开花期时间为 2016 年 4 月 29 日和 2017 年 4 月 30 日;灌浆期时间为 2016 年 5 月 12 日和 2017 年 5 月 13 日。

2 种肥料类型分别为普通尿素(U)和腐熟的有机肥牛粪(M)。施氮水平分别为 180 kg/hm<sup>2</sup>(U1,M1)和 90 kg/hm<sup>2</sup>(U2,M2)。施肥前对牛粪的养分含量及含水量进行测定,2 年试验所用牛粪养分含量分别

为 2015—2016 年,全氮(N)0.35%,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)0.42%,全钾(K<sub>2</sub>O)0.33%,质量含水量为 78.98%;2016—2017 年,全氮(N)0.40%,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)0.49%,全钾(K<sub>2</sub>O)0.35%,质量含水量为 77.25%。每个处理的 P、K

量分别为  $P_2O_5$  150 kg/hm<sup>2</sup> 与  $K_2O$  150 kg/hm<sup>2</sup>。施用时间减去牛粪所含磷钾量。牛粪、磷钾肥一次性基肥,尿素是基肥和拔节肥 1:1 施用,2 年试验基肥施用日期均为 10 月 10 日,追肥施用日期为 2016 年 3 月 29 日,2017 年 4 月 1 日,2015—2017 年具体施肥量见表 2。

表 2 不同施肥处理的具体施肥量

		单位:kg/hm <sup>2</sup>				
年份	处理	腐熟牛粪	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	
2015—2016	U1	0	218	2158	470	
	U2	0	109	2158	470	
	M1	50561	0	234	132	
	M2	25280	0	1196	301	
2016—2017	U1	0	218	2158	470	
	U2	0	109	2158	470	
	M1	47474	0	171	167	
	M2	23737	0	1164	319	

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 小麦光合处理特性测定 于小麦花前 30 天(2016 年 3 月 31 日和 2017 年 4 月 1 日),花前 15 天(2016 年 4 月 14 日和 2017 年 4 月 21 日),开花期(2016 年 4 月 29 日和 2017 年 4 月 30 日),花后 15 天(2016 年 5 月 15 日和 2017 年 5 月 16 日),花后 30 天(2016 年 5 月 30 日和 2017 年 6 月 1 日),分别在 3 个重复的小区中随机选取 5 片生长一致的完全展开旗叶,并挂牌标记,采用 CIRAS-II 型便携式光合测定系统在晴天上午 9:30—11:30 测定旗叶光合速率( $P_n$ , mmol/(m<sup>2</sup>·S)),蒸腾速率( $Tr$ , mmol/(m<sup>2</sup>·S))等光合指标,每片读取数据 2 次,取 10 次结果的平均值。根据测定的净光合速率和蒸腾速率计算单叶水分利用效率(LWUE,  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )计算公式为  $LWUE = P_n / Tr$ 。

1.3.2 叶面积指数(LAI) 在花前 30 天,花前 15 天,开花期,花后 7 天,花后 15 天,花后 30 天取样,每处理选取 20 株长势一致的代表性植株,测量植株的叶片长和宽,计算叶面积指数。单株叶面积=叶长×叶宽×0.83,叶面积指数=(单株叶面积×单位土地面积株数)/单位土地面积。

1.3.3 叶绿素总含量测定 在花前 30 天,花前 15 天,开花期,花后 7 天,花后 15 天,花后 30 天取样,每小区选取 5 片整齐一致具有代表性的叶片,参照 Arnon<sup>[16]</sup>的方法,取鲜样称量后,用 10 mL 95%乙醇避光提取 48 h,用双通道紫外—可见分光光度计(UV-2450 型,日本岛津公司)比色。

1.3.4 干物质及产量测定 于冬小麦花前 30 天,花前 15 天,开花期,花后 15 天,花后 30 天,花后 40 天取样,每个小区随机取样 20 个单茎,3 次重复,去掉

根部,将地上部分分成茎秆、叶片、颖壳+穗轴、籽粒四部分,样品 105 ℃条件下杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称干重。冬小麦成熟期每个小区中部 1 m<sup>2</sup> 收获测产,脱粒并经自然风干后称重。收获时计数穗数和穗粒数,在脱粒后风干的籽粒中随机取样测定千粒重,重复 3 次。

产量(kg/hm<sup>2</sup>) = 穗数(穗/hm<sup>2</sup>) × 穗粒数 × 千粒重/10<sup>6</sup> × (1-含水量%)/(1-14%)

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010、DPS 7.5 和 SPSS 19.0 软件进行试验数据分析,用 LSD 法进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ ),利用 Sigmaplot 12.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮互作对冬小麦光合生理特性的影响

由图 1 可知,水氮互作对冬小麦旗叶净光合速率影响显著,各处理光合速率在开花期达到峰值,花后随着时间推进,各处理的光合速率均呈现持续下降的趋势,2015—2016 年开花期 W1U1 处理的旗叶光合速率最高,W2M2 最低,2016—2017 年开花期 W1M1 处理的光合速率峰值最高,W2U2 最低;从供水水平看,2 年试验内,W<sub>1</sub> 处理的光合速率均显著高于 W<sub>2</sub> 处理,供水量显著影响旗叶光合速率;从施氮水平来看,施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 的处理的旗叶光合速率显著高于施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 的处理,说明高施氮量显著提高小麦旗叶光合速率;不同肥料类型相比,花后随着生育期推进,U 处理的净光合速率下降明显,而 M 处理的净光合速率下降较为平缓,灌浆期光合速率维持在较高水平。经显著性检验,冬小麦光合速率的水氮互作效应达显著水平( $P < 0.05$ ),供水量对冬小麦旗叶光合速率的影响达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

旗叶蒸腾速率与光合速率的变化趋势基本一致,这说明蒸腾速率与光合速率有很好的平衡关系(图 2)。各处理的蒸腾速率峰值均在开花期出现,2 年试验峰值最高的处理均为 W1M1。不同灌溉量之间相比,W<sub>2</sub> 处理的蒸腾速率显著低于 W<sub>1</sub> 处理,第 2 年试验内 W<sub>2</sub> 处理的蒸腾速率下降幅度更大;高施氮量处理的蒸腾速率显著高于低施氮量处理,这也是光合速率出现差异的原因;供水量与施氮量相同的条件下,不同氮肥类型之间的蒸腾速率差异不显著。

单叶水分利用效率(LWUE)反映了作物光合指标测定时的生长状况,由图 3 可知,不同氮肥类型之间的 LWUE 差异不明显,高施氮量处理的 LWUE 高于低施氮量处理,W<sub>2</sub> 处理的 LWUE 高于 W<sub>1</sub> 处理。

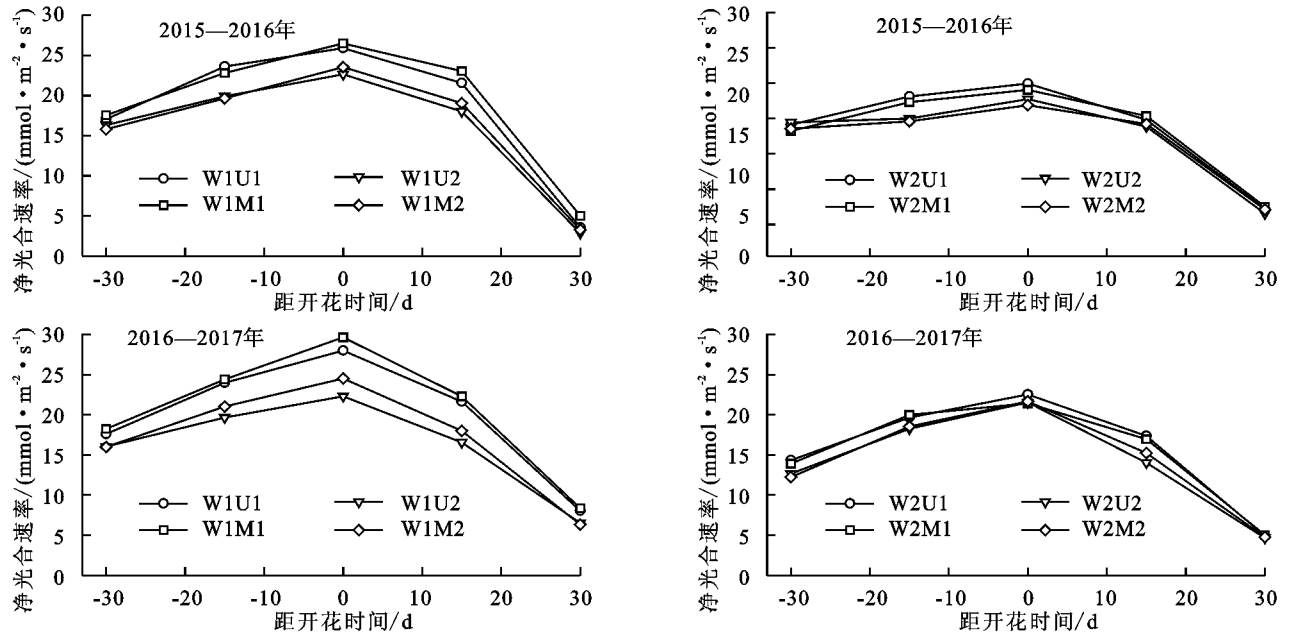


图 1 不同水氮处理下小麦旗叶光合速率

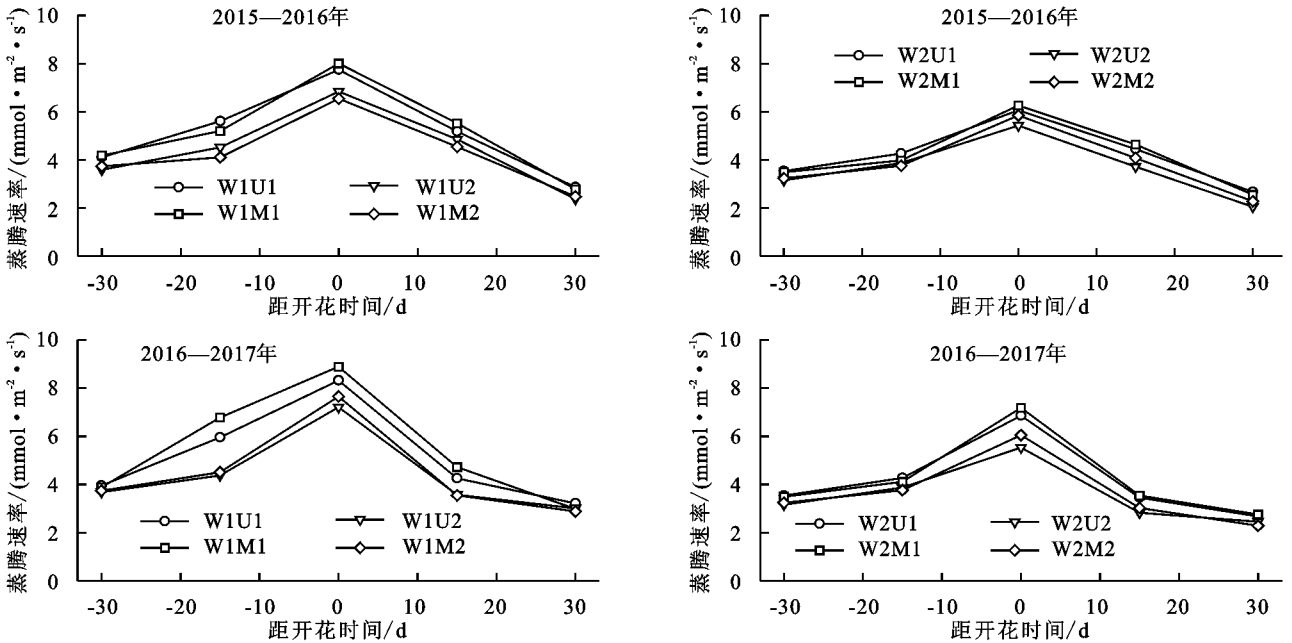


图 2 不同水氮处理下小麦旗叶蒸腾速率

## 2.2 水氮互作对冬小麦叶面积指数(LAI)的影响

由图 4 可知,冬小麦叶面积指数(LAI)呈现出先增加后降低的趋势,花前 15 天(挑旗期)左右达到峰值,之后逐渐降低。供水量和施氮量均显著影响冬小麦 LAI。W2 条件下各处理 LAI 显著低于 W1;灌溉量和氮肥类型相同的条件下,施 180 kg/hm<sup>2</sup> 的处理的 LAI 高于施 90 kg/hm<sup>2</sup> 的处理。第 1 年试验内不同肥料类型的 LAI 存在差异,表现为 U>M,第 2 年试验不同肥料类型的叶面积指数差异不明显,生育后期 M 处理的 LAI 下降平缓,而 U 处理的 LAI 随生育进程迅速下降。

## 2.3 水氮互作对冬小麦叶绿素总含量的影响

冬小麦的旗叶绿素总含量呈现出先增加后降低的趋势(图 5),2 年试验叶绿素总含量均在花后 7

天达到峰值,之后随生育进程有不同程度的降低,2 年试验峰值最高的处理均为 W1U1,2015—2016 年叶绿素总含量峰值达到 6.72 mg/g,2016—2017 年峰值达到 7.64 mg/g。不同灌溉量相比,适宜灌溉量 W1 处理的叶绿素含量显著高于胁迫灌溉量 W2,灌溉量和氮肥类型相同的条件下,施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 的处理的叶绿素含量显著高于施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 的处理,不同肥料类型之间 2015—2016 年 U 处理的叶绿素含量略高于 M 处理,2016—2017 年 M 处理的叶绿素含量高于 U 处理,U 处理的叶绿素总含量在生育后期迅速下降,M 处理的叶绿素总含量随生育进程平稳下降。2 年试验相比,第 2 年各处理之间差异较第 1 年显著。

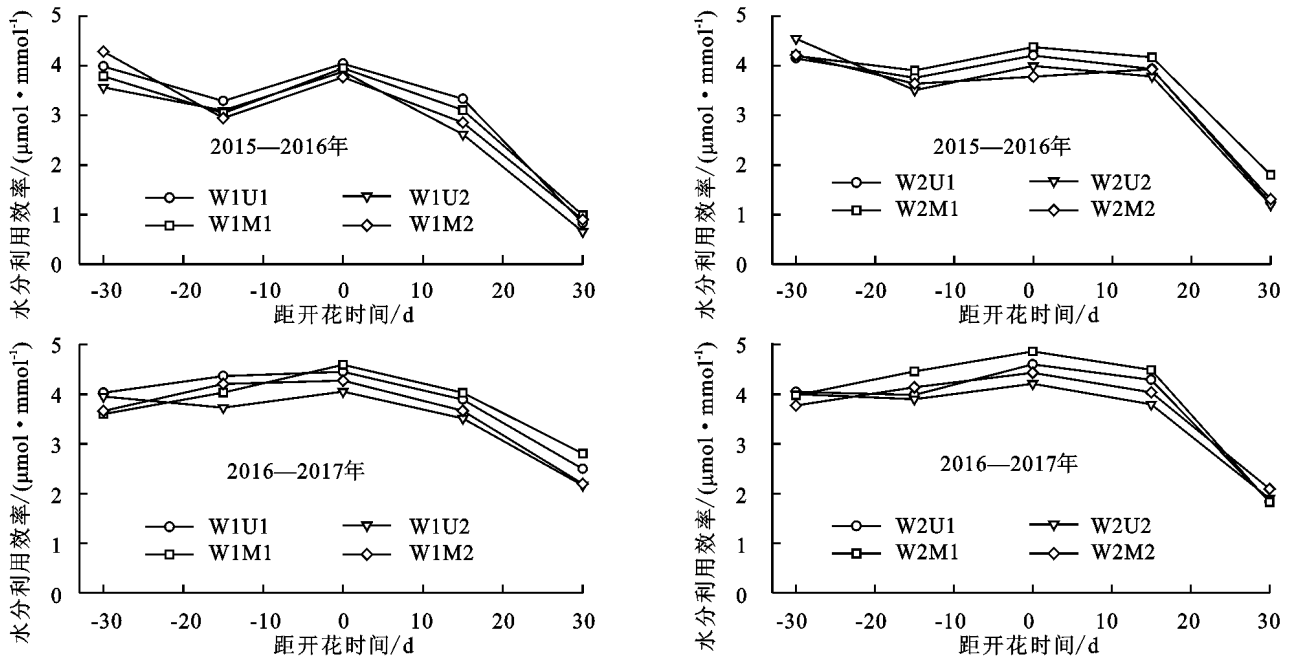


图 3 不同水氮处理下小麦旗叶水分利用效率

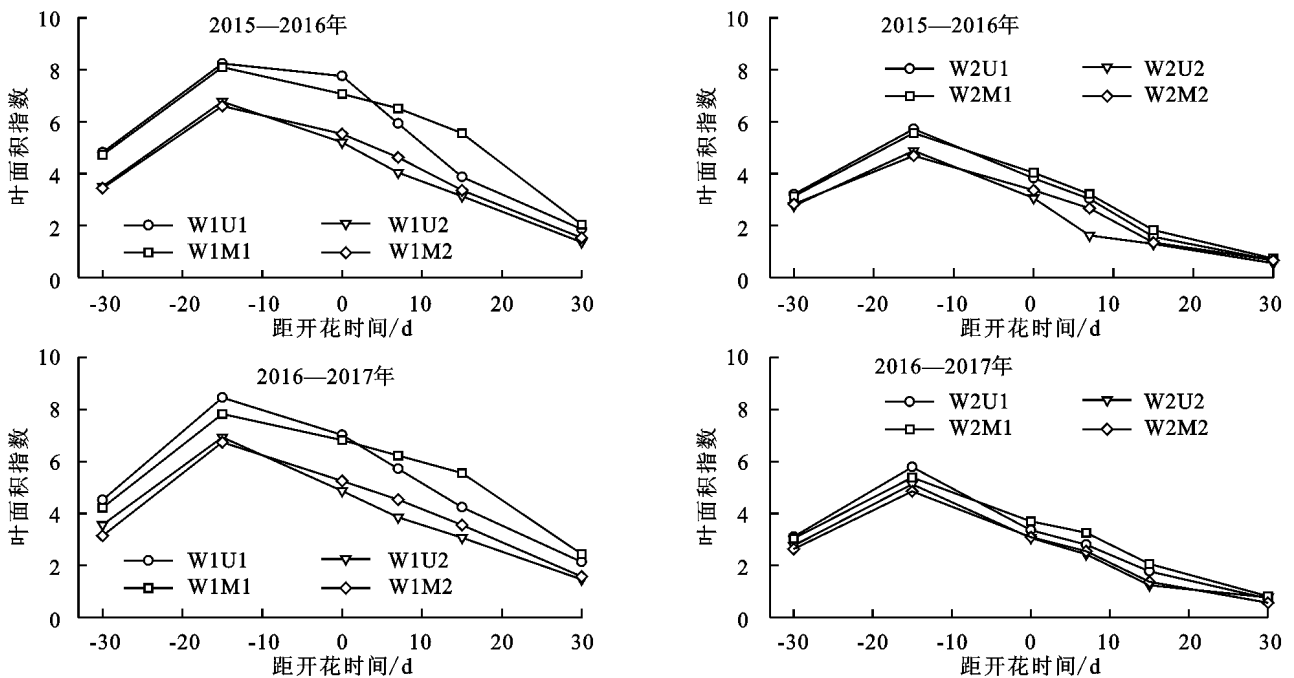


图 4 不同水氮处理下小麦叶面积指数

2.4 水氮互作对冬小麦干物质积累与分配的影响

2.4.1 不同生育时期干物质积累量 由图 6 可知,供水量、施氮量、肥料类型均影响冬小麦干物质积累,2 年试验内干物质积累量最多的处理均为 W1M1,施氮量和肥料类型相同的条件下,W1 处理的干物质积累量高于 W2 处理;不同施氮量条件下,施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理的干物质积累量高于 90 kg/hm<sup>2</sup>,不同氮肥类型相比,2 年试验均表现为花后 15 天前 U 处理的干物质积累量大于 M 处理,花后 15 天后 M 处理的干物质积累量高,这可能与有机氮肥肥效更持久有关。

2.4.2 水氮互作对冬小麦成熟期干物质在不同器官

中分配的影响 由表 3 可知,2 年试验内冬小麦成熟期干物质在各器官中分配的比例为:籽粒占 37.71%~47.13%;叶片占 11.68%~16.28%;茎+叶鞘占 27.20%~32.90%;颖壳+穗轴占 12.03%~18.98%;各处理间干物质向叶片、茎+叶鞘的分配量差异不明显,2015-2016 年生长季各处理间干物质向籽粒、颖壳+穗轴的分配量差异不显著;2016-2017 年生长季中,W2U2、W2M2 处理的干物质向颖壳+穗轴分配量显著高于其他处理;W1U1、W1M1 处理的干物质向籽粒分配量显著高于其他处理,W1 处理的籽粒分配量高于 W2 处理。

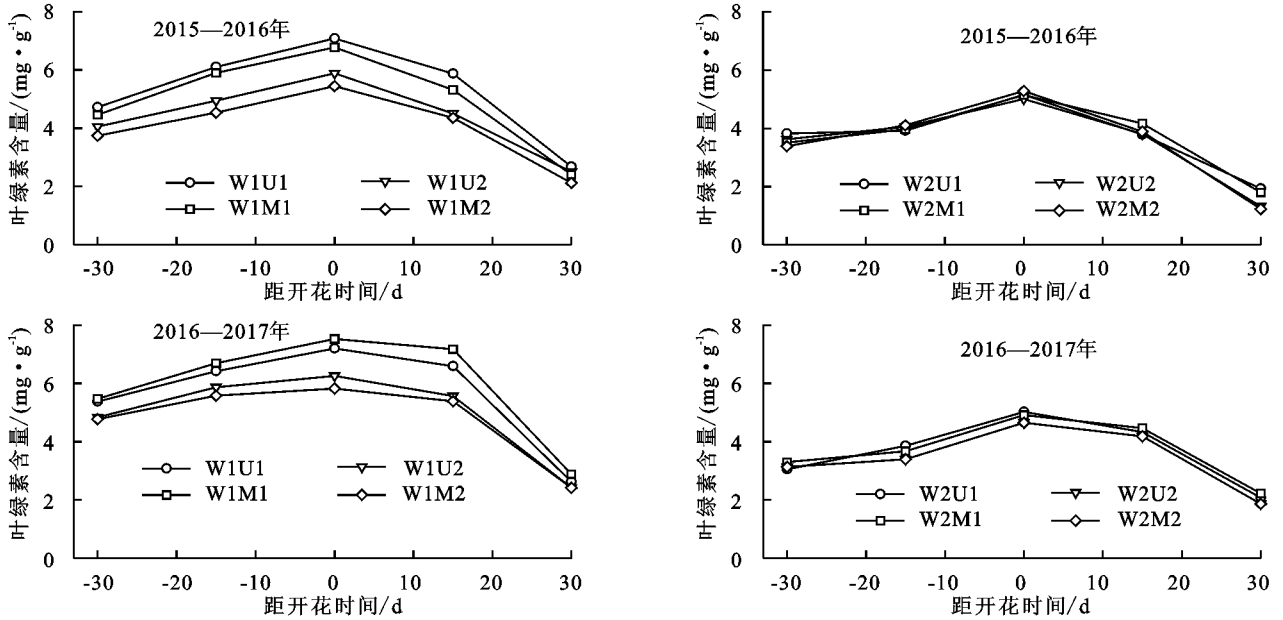


图 5 不同水氮处理下小麦旗叶叶绿素含量

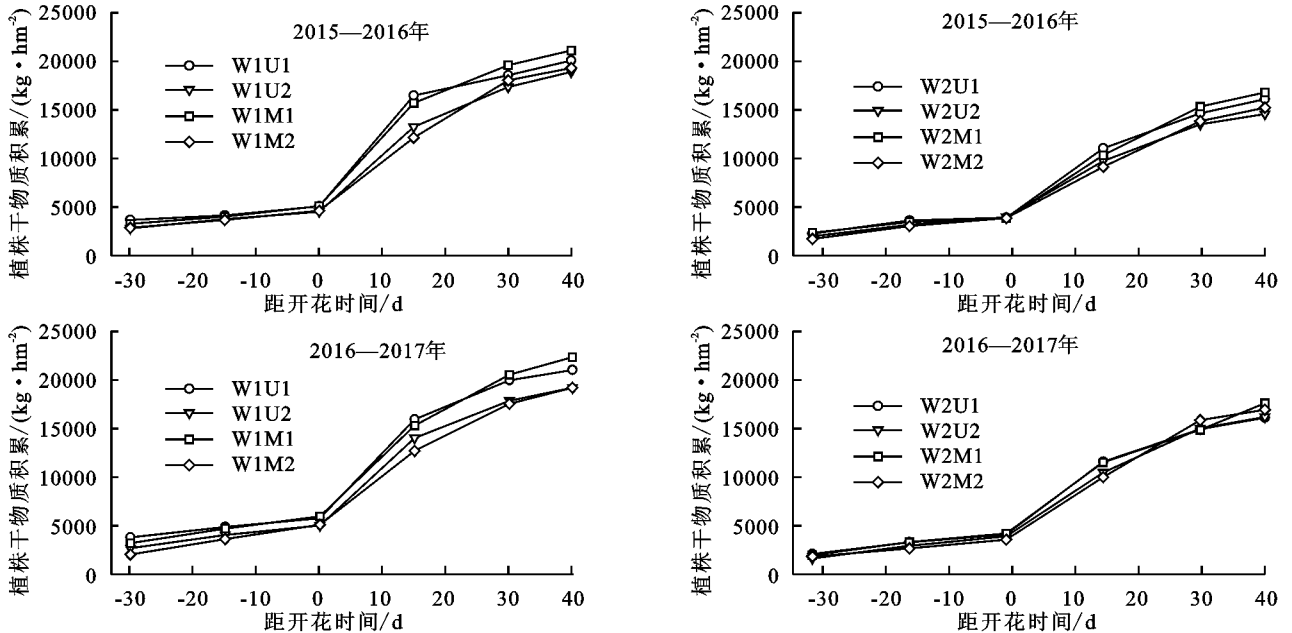


图 6 不同水氮处理下小麦干物质积累动态

表 3 不同水氮处理对成熟期不同器官中干物质分配量及其分配比例的影响

年份	处理	单株不同器官干物质重/g				干物质分配比例/%			
		籽粒	叶片	茎+叶鞘	颖壳+穗轴	籽粒	叶片	茎+叶鞘	颖壳+穗轴
2015—2016	W1U1	3.21ab	1.17b	2.59a	1.21b	39.20a	14.36b	31.66a	14.76d
	W1U2	3.07b	1.01bc	2.18c	1.22b	40.98a	13.55c	29.10b	16.35b
	W1M1	3.38a	1.42a	2.65a	1.27b	38.73ab	16.28a	30.42ab	14.55d
	W1M2	2.95b	1.11b	2.11c	1.31a	39.38a	14.86b	28.17bc	17.57a
	W2U1	2.82bc	0.83cd	2.28b	1.16c	39.72a	11.68e	32.18a	16.39b
	W2U2	2.54c	0.78d	2.15c	1.05c	38.90ab	12.01d	32.90a	16.17b
	W2M1	2.97b	0.92c	2.36b	1.02c	40.79a	12.63cd	32.44a	14.11d
	W2M2	2.52c	0.80d	2.06cd	0.99d	39.60ab	12.58d	32.29a	15.51c
2016—2017	W1U1	3.50b	1.01ab	2.36a	0.95b	44.66ab	12.96d	30.19ab	12.17d
	W1U2	2.93c	0.97ab	2.29a	1.17ab	39.73b	13.26c	31.09a	15.90c
	W1M1	3.88a	1.09a	2.27ab	0.99b	47.13a	13.27c	27.55c	12.03d
	W1M2	3.22bc	0.99ab	2.09b	1.22a	42.72ab	13.17c	27.83c	16.26bc
	W2U1	2.46d	0.81c	1.89bc	1.12ab	39.16b	12.76d	30.17ab	17.90ab
	W2U2	2.18e	0.86c	1.65c	0.98b	38.41b	15.17a	29.12b	17.27b
	W2M1	2.47d	0.94b	2.00b	1.14ab	37.71b	14.33ab	30.54ab	17.40b
	W2M2	2.25de	0.94b	1.61c	1.13ab	37.92b	15.87a	27.20c	18.98a

## 2.5 水氮互作对冬小麦产量及产量构成因素的影响

由表4可知,水氮互作对冬小麦产量构成因素有显著影响。氮肥类型与供水量对小麦千粒重和穗粒数的影响存在交互作用,W1条件下,千粒重表现为M1>U1,U2与M2差异较小,穗粒数表现为M1>U1,W2条件下,2种肥料类型穗粒数无显著差异。施氮量和供水量增加,穗粒数和千粒重也随之增加。2年试验产量最高的处理均为W1M1,2015—2016年最高产量为8655.1 kg/hm<sup>2</sup>,2016—2017年产量为9953.4 kg/hm<sup>2</sup>。

表4 不同施肥灌溉处理下冬小麦产量及产量构成因素

年份	处理	穗数/ ( $\times 10^4$ 穗·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数	千粒重/ g	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
2015—2016	W1U1	433.0a	41.0b	46.4b	8239.7b
	W1U2	426.5a	40.8bc	45.3c	7871.6c
	W1M1	434.0a	42.3a	47.2c	8655.1a
	W1M2	426.0a	40.2cd	44.2d	7561.6d
	W2U1	415.5b	39.6d	43.9d	7224.8e
	W2U2	409.0b	37.7f	42.3d	6510.1f
	W2M1	432.5a	38.7e	45.5e	7614.8d
	W2M2	408.0b	37.8f	41.9e	6473.5f
2016—2017	W1U1	458.5a	40.8bc	47.9b	8970.3b
	W1U2	440.5b	39.8bc	43.9d	7703.8d
	W1M1	471.0a	42.1a	50.2a	9953.4a
	W1M2	443.0b	40.1b	45.7c	8248.9c
	W2U1	387.5c	38.8cd	41.9e	6307.1e
	W2U2	377.5c	36.3e	40.1ef	5602.5g
	W2M1	388.0c	38.9c	41.9e	6336.3e
	W2M2	378.5c	37.9d	40.3f	5778.3f

## 3 讨论

### 3.1 水氮互作对冬小麦光合生理特性的影响

叶片光合能力是植物光合作用强弱的重要反映,决定着植物生产力的高低。水氮通过影响叶片色素、叶面积指数大小等多种因素对植株光合作用造成影响,进而影响产量。供水不足会导致旗叶蒸腾速率变低,李晶晶等<sup>[17]</sup>研究表明,减少供水量导致冬小麦旗叶光合速率、蒸腾速率明显下降。本试验结果表明,供水量500 mm(W1)处理的旗叶光合速率,蒸腾速率显著高于供水量250 mm(W2)处理,W2处理的单叶水分利用效率高于W1处理,表明低供水量导致小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率为适应水分供应不足而显著下降,从而提高了单叶水分利用效率,这与王红光等<sup>[18]</sup>研究结果基本一致。水分短缺条件下施用氮肥可以缓解水分胁迫对小麦光合生理特性的不利影响,董博等<sup>[19]</sup>研究表明,增施氮肥提高了小麦旗叶叶绿素含量和单叶水分利用效率,施氮量越高,光和参数增加数值越大,本试验相同供水量条件下高施氮量处理的叶绿素含量和单叶水分利用效率明显高于低施氮量处理,供水量500 m,施有机氮肥180 kg/hm<sup>2</sup>处理叶绿素含量相对其他处理一直保持较高水平,这为其保持较高的净光合速率,提高光合能力,进

而增加产量奠定了基础。叶面积指数变化直接反映了植株叶片生长发育情况,本试验结果表明,与无机肥处理相比,有机肥处理的叶面积指数在小麦生育后期下降速率缓慢,供水量500 mm条件下高施氮量有效缓解叶面积指数下降速率,供水量250 mm条件下各处理差异不显著,说明生育后期水分供应不足影响籽粒灌浆环境进而影响氮素对旗叶生理性状的优化。施用有机肥条件下合理的水氮互作在小麦生育后期可有效缓解叶面积指数下降速率,提高光合速率,保持较高的生理代谢能力,为小麦高产提供保障。

### 3.2 水氮互作对冬小麦干物质及产量的影响

小麦成熟籽粒中的干物质有20%~30%来自旗叶的光合作用,光合作用对作物产量的贡献率达到90%<sup>[20]</sup>,适宜的水氮管理和干物质积累与分配密切相关。谷艳芳等<sup>[21]</sup>研究表明,不同供水处理条件下小麦干物质积累量存在差异,本试验供水量500 mm条件下各处理的干物质积累量明显高于供水量250 mm的处理,说明较高的供水量有效满足了小麦地上部生长发育的需要;金修宽等<sup>[22]</sup>研究表明,小麦干物质积累量随施氮量增加而增加,本试验相同供水量条件下施氮180 kg/hm<sup>2</sup>处理的干物质积累量明显高于施氮90 kg/hm<sup>2</sup>的处理,表明增施氮肥促进干物质的积累<sup>[23]</sup>;小麦花后籽粒干重及地上部总干重随生育进程不断增加,本试验供水量500 mm条件下不同施氮量处理的成熟期植株干物质重及籽粒干物质分配量差异较大,施氮量180 kg/hm<sup>2</sup>处理的干物质积累量及籽粒干物质分配量明显高于施氮90 kg/hm<sup>2</sup>的处理表明适宜的供水量与施氮量互作提高了冬小麦干物质积累能力,增加光合产物向籽粒的分配<sup>[24]</sup>,供水量250 mm(W2)条件下各处理的干物质积累量明显低于供水量500 mm(W1),说明W2条件不能满足小麦对水分需求,供水不足导致光合速率下降,影响光合同化产物合成。干物质生产是产量形成的基础,水氮对冬小麦光合生理特性的影响反映在干物质积累动态变化与分配比例上进而最终影响小麦产量。本试验供水量500 mm条件下,施氮180 kg/hm<sup>2</sup>处理的干物质积累量和产量均显著高于施氮90 kg/hm<sup>2</sup>处理,说明充足的供水量与施氮量互作保证了氮肥肥效的充分发挥,促进光合产物的积累,提高小麦产量;本试验条件下有机肥处理增产幅度高于无机肥处理,可能的原因是施肥并灌溉后无机肥尿素迅速分解释放养分,有机肥肥效持久且增加土壤有机质和矿化氮含量,活化土壤中潜在养分和增强生物学活性,水肥效果相互促进,满足了小麦生育后期的氮素需求因而施用有机肥的处理获得更高的产量<sup>[25]</sup>。

## 4 结论

(1) 施氮量、供水量、氮肥类型 3 因素互作对冬小麦旗叶光合速率及籽粒产量的影响达到显著水平,合理的水氮运筹可以改善冬小麦光合性能,影响干物质积累与分配进而促进产量增加。水分因子主要影响了叶肉细胞的净光合速率、蒸腾速率和单叶水分利用效率,进而影响了小麦的光合生理特性;而氮肥效应中施氮量主要通过提高叶绿素含量,缓解水分胁迫带来的逆境伤害来增强光合速率;有机氮肥的“缓效性”延长了开花期后叶面积的高值持续期,确保灌浆期小麦光合速率维持在较高水平,提高了冬小麦干物质积累能力,促进生育后期光合产物向籽粒分配,有利于小麦的产量形成;同时保证了生育后期的养分供应,与小麦生育后期需肥需水的同步性更好,有利于作物对养分的吸收利用。

(2) 水分、氮肥用量、氮肥类型对冬小麦光合生理特性有明显的互作效应,有机肥的增产效果优于无机肥。本试验条件下,生育期内供水 500 mm,施用 180 kg/hm<sup>2</sup> 有机氮肥时冬小麦光合性能好,产量高。

### 参考文献:

- [1] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, et al. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124(2): 20-27.
- [2] 宋先松,石培基,金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(2): 162-166.
- [3] 串丽敏,何萍,赵同科. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76-86.
- [4] 赵连佳,薛丽华,孙乾坤. 不同水氮处理对滴灌冬小麦田耗水特性及水氮利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1050-1059.
- [5] 孟兆江,卞新民,刘安能,等. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 182-186.
- [6] 谢英荷,栗丽,洪坚平,等. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1354-1361.
- [7] 张瑞,董琦,王爱萍,等. 等氮条件下有机无机肥配施对小麦光合特性和群体结构的影响[J]. *激光生物学报*, 2017, 26(3): 281-288.
- [8] Wang Y Q, Wen-xing X I, Wang Z M, et al. Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2247-2256.
- [9] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(4): 704-711.
- [10] 张珂珂,周苏玫,张嫚,等. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 863-872.
- [11] Gu L M, Liu T N, Zhao J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 374-388.
- [12] 郭天财,冯伟,赵会杰,等. 水分和氮素运筹对冬小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1512-1517.
- [13] 关静. 农业肥料施用中存在的问题以及建议[J]. *中国农业信息*, 2017(18): 15-17.
- [14] 孙永健,孙园园,李旭毅,等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(11): 2055-2063.
- [15] 孙永健,孙园园,徐徽,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(9): 1639-1649.
- [16] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1.
- [17] 李晶晶,尹钧,李武超,等. 不同水氮运筹对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(5): 27-33.
- [18] 王红光,于振文,张永丽,等. 测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2495-2503.
- [19] 董博,张绪成,张东伟,等. 水氮互作对春小麦叶片叶绿素含量及光合速率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(6): 88-93.
- [20] 于显枫,郭天文,张仁陟,等. 水氮互作对春小麦叶片气体交换和叶绿素荧光参数的作用机制[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(3): 117-12.
- [21] 谷艳芳,丁圣彦,高志英,等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1167-1173.
- [22] 金修宽,赵同科. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及氮素吸收分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 233-239.
- [23] 徐国伟,陆大克,王贺正,等. 干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1225-1237.
- [24] 尹飞,陈明灿,刘君瑞. 氮素形态对小麦花后干物质积累与分配的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(13): 78-81.
- [25] 刘益仁,李想,郁洁,等. 有机无机肥配施提高麦—稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 81-86.