

减氮适水对冬小麦光合特性与土壤水氮分布的影响

丛鑫¹ 庞桂斌¹ 张立志² 徐征和¹ 杨金梁¹ 牟晓宇¹

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014)

摘要: 针对华北平原农业生产中存在的灌溉水资源不足、氮肥投入过量的问题,以冬小麦为材料,分别设置3个供水水平(W1(60% ET_c (参考作物需水量), 300 mm)、W2(75% ET_c , 370 mm)、W3(ET_c , 495 mm))和3个施氮水平(N1(180 kg/hm²)、N2(255 kg/hm²)、N3(330 kg/hm²)),于2018—2019年利用渗漏池小区进行田间试验,研究不同水氮对土壤水氮分布、冬小麦旗叶功能期内光合特性、光响应曲线参数以及籽粒产量的影响。结果表明:减氮适水(W2N2)能在维持冬小麦生长需求的前提下,提高水氮利用效率,较W3N3处理多利用土壤蓄水量41.12 mm,减少硝态氮淋失量15.87%;水氮协同对小麦旗叶光合特性影响显著,W2、W3处理的旗叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)明显高于W1处理,但二者差异不显著,N2、N3处理的旗叶 P_n 、 T_r 和 G_s 明显高于N1处理,且二者差异也不显著;测产结果显示,W2N2产量最高,且差异显著,产量与光合特性、部分光响应曲线参数呈显著性关系,这说明水氮对光合特性的提高有利于光合产物的积累,进而提高了产量。在本试验条件下,冬小麦生育期供水量370 mm、施氮肥255 kg/hm²时,既能维持冬小麦较高的光合特性和产量,又能提高土壤蓄水的利用和降低硝态氮淋失风险,达到华北平原冬小麦生产节水、减肥、环保、增效的目的。

关键词: 冬小麦; 减氮; 适水; 土壤水氮分布; 光合特性; 光响应曲线

中图分类号: S512.1⁺1; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0324-09 OSID: 

Effects of Nitrogen-reducing and Suitable Water on Photosynthetic Characteristics of Winter Wheat and Distribution of Soil Water and Nitrogen

CONG Xin¹ PANG Guibin¹ ZHANG Lizhi² XU Zhenghe¹ YANG Jinliang¹ MU Xiaoyu¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Ji'nan 250022, China
2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Insufficient irrigation water resources and excessive input of nitrogen fertilizer are very common in agricultural production in North China Plain. In order to deal with these problems, a field trial with winter wheat as test material was conducted in the lysimeters in 2018—2019. Under three irrigation levels of W1 (60% ET_c (reference crop water requirement), 300 mm), W2 (75% ET_c , 370 mm) and W3 (ET_c , 495 mm), and three nitrogen levels of N1 (180 kg/hm²), N2 (255 kg/hm²) and N3 (330 kg/hm²), the effects of irrigation-fertilization methods on soil water and nitrogen distribution, photosynthetic characteristics and light response curve parameters of winter wheat flag leaf function period and wheat grain yield were examined. The results showed that W2N2 treatment can maintain wheat growth demand and improve water and nitrogen use efficiency, which increased soil water storage by 41.12 mm and decreased soil nitrate leaching by 15.87%, compared with that of W3N3 treatment. The interaction of water and nitrogen had a significant effect on the photosynthetic characteristics of wheat flag leaves. The P_n , T_r and G_s of W2 and W3 treatments was significantly higher than that of W1 treatment, but there was no significant difference between them, and N treatment had the same response. According to the result of yield test, W2N2 had the largest yield, with significant difference than other treatments. In addition, there was a significant relationship between yield and photosynthetic characteristics, light response curve parameters, which indicated that the improvement of photosynthetic characteristics caused by water and

收稿日期: 2020-08-24 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800601-02)和山东省水利科研项目(SDSLKY201803)

作者简介: 丛鑫(1994—),女,博士生,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: congxin1994@126.com

通信作者: 徐征和(1968—),男,教授,博士,主要从事农田水利研究,E-mail: xu4045@126.com

nitrogen was conducive to the accumulation of photosynthetic products, and then increased the yield. Under the conditions of this experiment, W2 treatment (irrigated 370 mm in overwintering period, 75% ET_c) combined with N2 treatment (with nitrogen application rate of 255 kg/hm²) can not only maintain high photosynthetic characteristics and crop yield, but also improve the utilization of soil water storage and reduce the risk of nitrate leaching, realizing the water-saving and nitrogen reduction production of winter wheat in the North China Plain.

Key words: winter wheat; nitrogen-reducing; suitable water; distribution of soil water and nitrogen; photosynthetic characteristics; light response curve

0 引言

华北平原是我国重要粮食产区,其粮食产量占我国粮食总产量的 20%^[1],冬小麦-夏玉米轮作是该地区的主要种植模式。粮食产量提高在很大程度上依赖于水肥的投入。在生产中为了追求高产量往往投入大量的水肥,过量的水肥会造成土壤剖面硝酸盐积累和地下水污染。华北平原粮食种植区普遍面临着地下水超采^[2]与污染^[3]的环境问题。

有研究指出,水氮管理在提高粮食产量和水氮利用效率、减少氮素损失方面具有很大的潜力^[4-5]。关于华北平原灌溉量与施氮量对冬小麦水氮利用效率、光合特性和产量的影响研究很多,但通过试验所得适宜水氮量并不一致。吕广德等^[6]在山东省泰安市以“泰山 28”冬小麦为研究对象进行试验,发现 450 m³/hm²和 180 kg/hm²的水氮互作处理可显著增强冬小麦干物质转化和旗叶的光合能力,从而增加了籽粒产量;张经廷等^[7]在河北省进行冬小麦水肥试验,提出基于作物相对产量的水肥耦合类型的评定方法,确定了 150 mm 和 120 kg/hm²的水氮组合协同增产效果最为明显;史辛凯等^[8]在山东省兖州市以“烟农 1212”为研究对象进行试验,发现在维持拔节期和开花期 0~40 cm 土层相对含水量均补灌至 70% 的灌溉水平下,210 kg/hm²的施氮量可以显著提高氮肥利用效率。上述研究中最佳水氮量的不同可能是由于冬小麦品种、种植区域土壤或气候的差异性而导致。

本研究在华北平原高水肥的生产基础上,通过减氮适水来调整设定不同的水氮方案,研究水氮协同对冬小麦生育期内土壤水氮分布、淋失以及冬小麦光合特性、产量的响应,以确定最佳的水氮方案,在保证冬小麦高产的前提下,提高土壤蓄水的利用水平,降低硝态氮在土壤中的积累与淋失,缓解过量施肥造成的效益降低与环境污染,为华北平原在节水减肥环保条件下实现冬小麦高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2018—2019 年冬小麦生长季,在山东省灌溉试

验中心站(36°34'N,116°50'E)利用水肥渗漏池小区进行田间试验。试验田地势平坦,地力均匀,前茬作物为夏玉米,土壤质地为壤土。冬小麦播种前试验田 0~20 cm 土层土壤含有机质质量比 10.89 g/kg、全氮质量比 1.07 g/kg、碱解氮质量比 87.60 mg/kg、速效磷质量比 22.26 mg/kg、速效钾质量比 83.98 mg/kg。0~100 cm 土层平均土壤容重为 1.57 g/cm³,平均田间最大持水量为 25.6%。冬小麦生育期总降雨量为 100.5 mm,自然降雨量分布见图 1。研究区自然降雨量少且分布不均,不能满足冬小麦高产生长发育的需要,需补充灌溉。

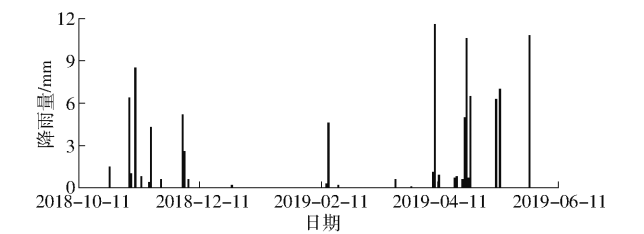


图 1 2018—2019 年冬小麦生长季的降雨量分布
Fig. 1 Precipitation distribution in 2018—2019 winter wheat season

1.2 试验设计

采用水氮二因素三水平完全组合设计,3 个供水水平,分别为减水(W1,60% ET_c (参考作物需水量),300 mm)、适水(W2,75% ET_c ,370 mm)和足水(W3, ET_c ,495 mm);3 个施氮水平,分别为施氮量优化 45% (N1,180 kg/hm²)、施氮量优化 23% (N2,255 kg/hm²)和高氮(N3,330 kg/hm²),3 次重复,共 27 个小区,小区面积 6.67 m²。小区灌溉分为 4 次,灌溉量见表 1;小区施肥分为 2 次,于播种前施基肥,其中磷肥(过磷酸钙)为 150 kg/hm²,钾肥(硫酸钾)为 150 kg/hm²,同时施入 50% 氮肥(尿素);拔节期追施剩余 50% 氮肥。供试冬小麦品种为“山农 28 号”,于 2018 年 10 月 16 日播种,播种量 130 kg/hm²,2019 年 6 月 1 日收获。其他管理措施同一般高产大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率和全生育期土壤耗水量
在土壤深度为 20、40、60、80、100 cm 处安装中

表 1 试验区冬小麦生育期间灌溉量

Tab.1 Amount of irrigation during winter wheat

growing season				mm
处理	灌水定额			
	播种后	拔节期	抽穗期	灌浆期
W1	35	90	75	0
W2	35	90	75	70
W3	35	90	150	120

子探针实时监测冬小麦全生育期土壤体积含水率变化,将其转化为质量含水率(SWC,%)。

全生育期土壤耗水量(ΔS ,mm)的计算公式为

$$\Delta S = W_H - W_S = h\rho(SWC_H - SWC_S) \times 10/100 \quad (1)$$

式中 W_H ——收获后蓄水量,mm

W_S ——播种期蓄水量,mm

h ——土层深度,cm

ρ ——土壤容重,g/cm³

SWC_H ——收获后含水率,%

SWC_S ——播种期含水率,%

1.3.2 土壤 NO₃⁻-N 含量

在播前及收获时用土钻在 0 ~ 100 cm 深度,每隔 20 cm 采集一个土样。土样放入塑料袋中编号,密封放入保温箱带回实验室,将土壤样品晾干,过孔径 0.25 mm 筛。称取 10.0 g 样品加入 50 mL CaCl₂ 浸提剂,摇匀,振荡,过滤,将浸提液适当稀释,加 1.00 mL 的 1:9 的 H₂SO₄ 溶液酸化,通过紫外分光光度法测定 NO₃⁻-N 含量。

1.3.3 淋溶液中 NO₃⁻-N 含量

采用田间渗滤池法监测 NO₃⁻-N 流失,每次灌水 3 ~ 5 d 后,淋溶液通过底部出口汇集水阀收集于容器内,测算淋溶液体积。

NO₃⁻-N 淋失总量的计算公式为

$$N_L = 0.01 \sum_{i=1}^n \frac{CN_{Li} V_i}{S} \quad (2)$$

式中 N_L ——硝态氮淋失总量,kg/hm²

n ——淋溶液收集次数

CN_{Li} ——硝态氮淋失质量浓度,mg/mL

V_i ——淋溶液体积,mL

S ——小区面积,m²

1.3.4 产量

收获时,从每个地块随机抽取 1 个 1 m²样方由人工剪穗。最后用脱粒机对样方冬小麦进行脱粒,自然风干后称量,换算为实际产量(Y ,kg/hm²)。

1.3.5 旗叶绿素相对含量

在冬小麦抽穗期与灌浆期,用日本 SPAD - 502 Plus 型叶绿素仪测定冬小麦旗叶绿素相对含量 (SPAD),在 09:00—11:00 对每个处理 3 个重复中

的 3 株冬小麦的 9 片旗叶叶片进行测定。

1.3.6 光合参数

在孕穗期和灌浆期灌水 2 d 后测定旗叶的光合生理指标。用 Li - 6400 型光合作用测定系统 (Li - cor, 美国) 选择晴天 (09:00—11:00) 对每个处理的 3 个重复中的 3 株冬小麦的 9 片旗叶叶片测定叶片光合速率 (P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、气孔导度 (G_s , $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率 (T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)。

1.3.7 光响应曲线

在冬小麦灌浆期测定光合作用的同时,在 0 ~ 1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照范围内设置 12 个光合有效辐射 (PAR) (0、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),测量各处理旗叶的净光合速率 (P_n)。通过直角双曲线修正模型^[9] 对光响应曲线进行拟合,可以确定表观量子效率 α 、最大净光合速率 $P_{n,\text{max}}$ 、表观暗呼吸速率 R_d 、光补偿点 LCP 和光饱和点 LSP 指标。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 软件整理数据,以 Excel 2010 和 Surfer 15 软件作图,SPSS 软件进行方差分析和多重显著性比较,表中每个指标值均为 3 个处理的均值,采用 LSD 法对数据进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期土壤含水率分布

图 2 为冬小麦生育期 0 ~ 100 cm 土层土壤含水率 (SWC) 的变化情况。随着生育期的推进,不同处理下的 SWC 逐渐出现差异,不同灌溉量相对施氮量的 SWC 差异显著,整体由大到小表现为 W3、W2、W1。从苗期开始到拔节期 SWC 虽总体在下降,但下降速度不大,且越往深层下降越慢,这是因为冬小麦该阶段需水量较小;随着后期试验灌溉量的不同和冬小麦需水量的增加,W1 处理相对其他处理的 SWC 在灌浆期显著较低,明显不能满足冬小麦的生长需求,会影响籽粒的灌浆程度,导致产量下降。在相同灌溉处理下,SWC 在不同施氮处理下,总体由大到小依次为 N3、N1、N2,这说明适量施氮才有利于冬小麦对土壤水分的吸收。

进一步分析不同水氮处理对各土层土壤蓄水的消耗 (表 2) 表明,在冬小麦成熟时,0 ~ 100 cm 土壤总体耗水量随灌溉量的增加而减少,在相同灌溉定额下随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,水氮对各土层的耗水量均表现出显著性差异。其中,W3 下 60 ~ 80 cm 土层含水率较播种前更高,说明 W3

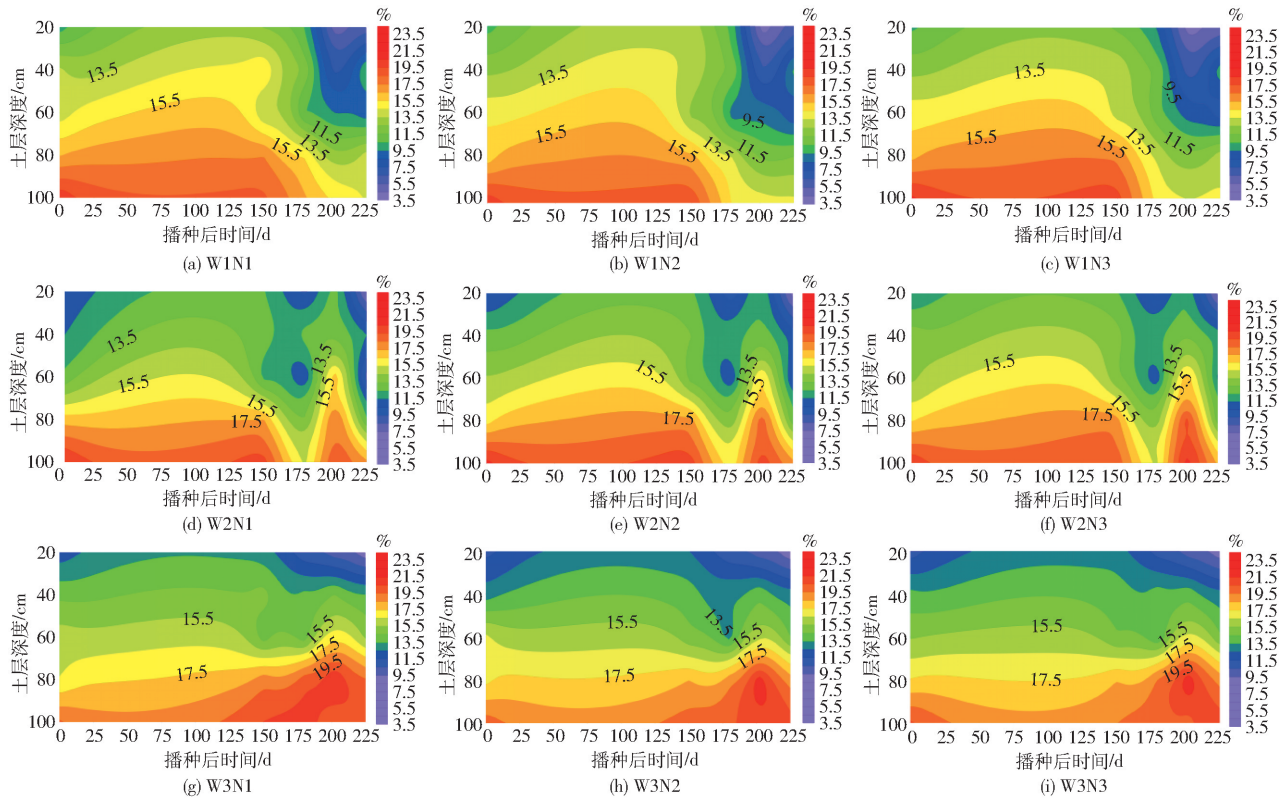


图2 不同处理0~100 cm 土层 SWC 变化

Fig. 2 Dynamic changes of SWC in 0 ~ 100 cm soil layer under different treatments

表 2 不同处理下冬小麦生育期 0 ~ 100 cm 土壤耗水量

Tab. 2 Soil water consumption amount in 0 ~ 100 cm soil layers of winter wheat under different treatments		mm					
处理		土层深度/cm					0 ~ 100
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	
W1	N1	11. 72	9. 51	15. 78	7. 63	17. 87	62. 50
	N2	12. 15	7. 35	19. 96	10. 24	16. 80	66. 49
	N3	12. 88	6. 45	18. 57	6. 54	15. 48	59. 91
W2	N1	10. 93	-0. 57	10. 64	13. 48	9. 55	44. 04
	N2	9. 83	5. 26	12. 78	9. 60	9. 56	47. 04
	N3	12. 76	5. 81	9. 09	10. 33	9. 05	47. 03
W3	N1	8. 93	2. 01	2. 19	-9. 35	-1. 44	2. 34
	N2	7. 42	0. 03	6. 92	-5. 36	-2. 77	6. 24
	N3	6. 38	2. 79	2. 40	-4. 54	-1. 11	5. 92
方差分析	W	**	**	**	**	**	**
	N	**	**	**	**	**	**
	W × N	**	**	**	**	**	**

注：** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)，下同。

下的土壤水分有所下移,利用程度相对较低。在不同施氮量下,W1 平均比 W2、W3 分别多利用土壤蓄水 16. 96、58. 13 mm,W1N2 相对其他处理腾出了较多的土壤水分库容。减氮适水 W2N2 处理利用土壤蓄水量比高氮足水 W3N3 处理多 41. 12 mm。

2.2 冬小麦生育期土壤 NO₃⁻-N 分布与淋失

冬小麦收获后各处理土壤 0 ~ 100 cm NO₃⁻-N 含量见图 3。可以看出,相同灌溉量下,NO₃⁻-N 含量随施氮量增加呈递增趋势,N3 下土壤中 NO₃⁻-N 含

量显著高于 N2 和 N1。从灌溉处理来看,在 W1 处理下,N1 与 N2 处理下的 NO₃⁻-N 含量始终处于一个相对较低的水平,N3 处理下 NO₃⁻-N 含量显著增加,W1 在 0 ~ 60 cm 土层 NO₃⁻-N 含量显著高于 W2 和 W3 处理,而 W2 和 W3 处理 60 ~ 100 cm 土层 NO₃⁻-N 含量显著高于 W1,这说明随着灌溉量的增加,土壤中 NO₃⁻-N 会随着水分向下迁移;在 W2 处理中 20 ~ 40 cm 土层 NO₃⁻-N 含量显著低于 W1 处理,N2 和 N3 处理 60 ~ 100 cm 土层 NO₃⁻-N 含量增加,这种变

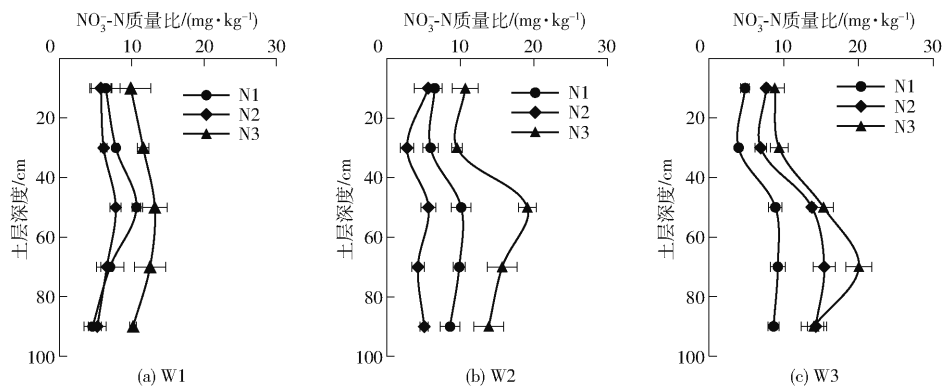


图3 冬小麦收获后0~100 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量剖面图

Fig.3 Soil NO₃⁻-N content in 0~100 cm profile after winter wheat harvest

化在 W3 处理中更为明显。这说明灌溉量和施氮量显著影响 NO₃⁻-N 在土壤中的积累和迁移,在相同施氮水平下,灌溉量的增加将加快 NO₃⁻-N 向下层土壤中迁移,相同灌溉量下,土层 NO₃⁻-N 的积累随施氮量的增加而增加。

图4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)为不同处理冬小麦全生育期在渗漏池下接到的渗滤液中 NO₃⁻-N 含量。由图4可知,在相同灌溉量下,随着施氮量的增加,NO₃⁻-N 淋失量增大,W3 处理不同施氮量下的 NO₃⁻-N 淋失量差距最为显著;W2 条件下,N3 淋失量比 N1、N2 处理分别高 23.69% 和 20.60%,结合图3 可以看出,高施氮(N3)下 80~100 cm 的土壤 NO₃⁻-N 累积浓度高,这均说明增施氮会加剧 NO₃⁻-N 淋失的风险。在相同施氮量下,随着灌溉量的增加,NO₃⁻-N 淋失量由大到小表现为 W3、W2、W1,结合图3 可以分析得到 NO₃⁻-N 含量随着灌溉量增加峰值逐渐下移,上述现象均说明了高灌溉也会增加 NO₃⁻-N 淋失的风险。减氮适水 W2N2 处理比高氮足水 W3N3 处理可减少 NO₃⁻-N 淋失量 15.87%。

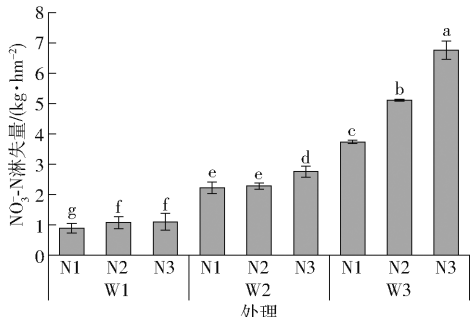


图4 不同处理下 NO₃⁻-N 淋失量

Fig.4 NO₃⁻-N leaching under different treatments

2.3 减氮适水对冬小麦旗叶光合特性的影响

2.3.1 冬小麦光合特性

由表3 可以看出,冬小麦抽穗期的光合速率显著高于灌浆期。在抽穗期,仅施氮对 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 产

生显著影响。因此,此时期氮对冬小麦光合特性的影响明显大于水和水氮交互效应,这说明适量的抽穗水就可以满足冬小麦叶片光合作用的需求,过量灌溉对提高冬小麦光合特性没有显著影响。

在灌浆期,灌溉、施氮对冬小麦叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均达到极显著水平;水氮交互作用对 P_n 达到显著水平,对 T_r 、 G_s 、 C_i 达到极显著影响。不同水氮处理下,叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 随水氮的变化趋势一致,仅 C_i 呈相反变化趋势。具体表现为:在相同施氮水平下,叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 在不同灌溉水平下由大到小表现为 W2、W3、W1,且 W2 和 W3 显著大于 W1,但二者差异不显著。这说明在底墒、拔节水和抽穗水的基础上,适量的灌浆水能显著提高灌后冬小麦的光合速率。在相同灌溉处理下,光合速率由大到小依次为 N2、N3、N1,N2、N3 下 P_n 显著高于 N1,但 N2、N3 之间差异不显著,说明减氮可增强旗叶光合速率,高氮并没有表现出优势,反而光合速率会有不同程度降低。不同水氮处理叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 最大值出现在 W2N2 处理。

SPAD 表现为随灌溉量与施氮量的增加先增后减的趋势,且相同灌溉下 N2 与 N3、相同施氮下 W2 与 W3 之间差异均不显著,证明了高施氮肥与足水灌溉对叶片叶绿素含量均不会表现出优势。

2.3.2 冬小麦光合响应曲线

图5 为在不同灌溉与施氮条件下灌浆期冬小麦旗叶叶片的光响应曲线,不同水氮处理的冬小麦光合响应曲线有所差异。但各曲线在总体趋势上一致,表现为在 0~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下光合速率迅速增强,之后缓慢变化,在 PAR 为 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 左右达到最大并趋于平稳。在相同灌溉下,N2 处理冬小麦叶片在相同光强下的光合速率高于 N3 和 N1 处理。在相同施氮条件下,W2 与 W3 下的曲线显著高于 W1,从光响应曲线随灌溉减少而下降的幅度来看,N1 下响应曲线间的光合速率下降幅度比 N2

表 3 不同处理下的冬小麦光合特性参数

Tab. 3 Photosynthetic characteristics of winter wheat under different treatments						
生育期	处理	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_i/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	SPAD
抽穗期	W1N1	(19.43 ± 2.94) ^{cd}	(3.91 ± 0.55) ^{bc}	(0.26 ± 0.04) ^c	(254.00 ± 13.6) ^b	(42.07 ± 2.25) ^c
	W1N2	(21.84 ± 2.44) ^{abcd}	(5.95 ± 0.16) ^a	(0.34 ± 0.04) ^b	(231.00 ± 6.11) ^c	(44.07 ± 2.29) ^b
	W1N3	(23.44 ± 0.60) ^{ab}	(6.15 ± 0.22) ^a	(0.36 ± 0.02) ^{ab}	(209.00 ± 12.20) ^{de}	(44.63 ± 2.68) ^b
	W2N1	(19.63 ± 1.04) ^{bcd}	(4.22 ± 0.24) ^b	(0.27 ± 0.04) ^c	(250.50 ± 6.56) ^b	(43.50 ± 4.06) ^{bc}
	W2N2	(22.76 ± 2.35) ^{abcd}	(6.13 ± 0.23) ^a	(0.36 ± 0.06) ^{ab}	(218.83 ± 7.83) ^d	(45.03 ± 4.54) ^b
	W2N3	(23.77 ± 1.90) ^a	(6.25 ± 0.44) ^a	(0.40 ± 0.03) ^a	(202.67 ± 12.03) ^e	(43.63 ± 6.31) ^{bc}
	W3N1	(18.99 ± 3.37) ^d	(3.71 ± 0.08) ^c	(0.24 ± 0.03) ^c	(269.33 ± 6.89) ^a	(43.20 ± 2.07) ^{bc}
	W3N2	(22.55 ± 0.79) ^{abcd}	(6.07 ± 0.20) ^a	(0.35 ± 0.02) ^{ab}	(215.50 ± 10.37) ^{de}	(52.53 ± 5.42) ^a
	W3N3	(23.03 ± 2.89) ^{abc}	(6.14 ± 0.29) ^a	(0.38 ± 0.02) ^{ab}	(209.83 ± 7.55) ^{de}	(50.20 ± 0.66) ^a
	W					
灌浆期	N	**	**	**	**	**
	W × N				**	
	W1N1	(15.82 ± 1.47) ^c	(2.59 ± 0.77) ^c	(0.17 ± 0.05) ^c	(327.00 ± 14.9) ^a	(34.37 ± 1.50) ^b
	W1N2	(18.51 ± 3.11) ^{bc}	(3.60 ± 0.34) ^b	(0.20 ± 0.04) ^{bc}	(281.00 ± 5.16) ^c	(37.73 ± 1.29) ^b
	W1N3	(18.24 ± 0.98) ^{bc}	(3.11 ± 0.46) ^{bc}	(0.20 ± 0.03) ^{bc}	(285.83 ± 6.68) ^c	(36.23 ± 1.86) ^b
	W2N1	(17.35 ± 2.20) ^c	(3.28 ± 0.18) ^{bc}	(0.21 ± 0.01) ^{bc}	(304.67 ± 19.95) ^b	(39.83 ± 2.46) ^b
	W2N2	(22.15 ± 1.72) ^a	(5.08 ± 0.56) ^a	(0.29 ± 0.06) ^a	(229.67 ± 9.27) ^d	(49.67 ± 1.08) ^a
	W2N3	(21.88 ± 1.00) ^a	(4.71 ± 0.28) ^a	(0.29 ± 0.02) ^a	(232.00 ± 7.16) ^d	(45.00 ± 1.56) ^a
	W3N1	(16.61 ± 0.65) ^c	(2.90 ± 0.79) ^{bc}	(0.20 ± 0.05) ^{bc}	(311.83 ± 11.91) ^b	(38.57 ± 2.12) ^b
	W3N2	(20.46 ± 2.03) ^{ab}	(4.59 ± 0.17) ^a	(0.27 ± 0.01) ^a	(235.33 ± 15.92) ^d	(46.23 ± 1.56) ^a
	W3N3	(20.04 ± 1.52) ^{ab}	(4.50 ± 0.37) ^a	(0.27 ± 0.02) ^a	(243.33 ± 14.75) ^d	(39.57 ± 1.86) ^b
	W	**	**	**	**	**
	N	**	**	**	**	**
	W × N	*	**	**	**	**

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$)，同列不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

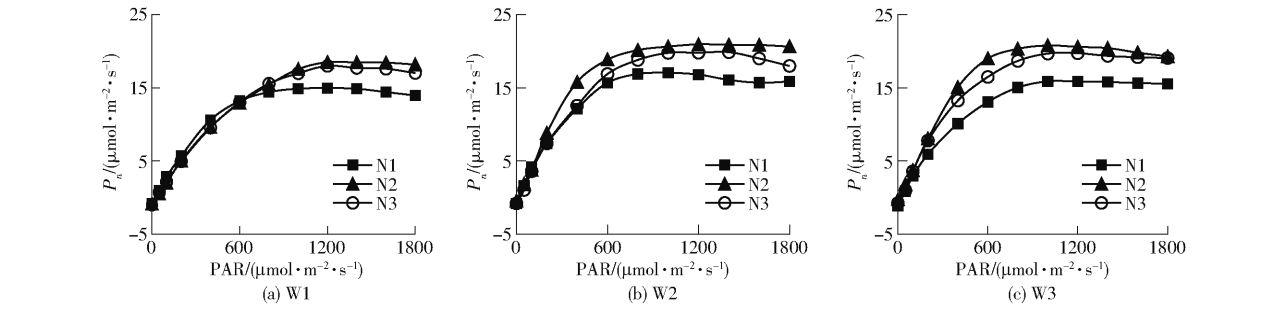


图 5 灌浆期旗叶净光合速率的光响应曲线
Fig. 5 Response curves of P_n to light in flag leaves at filling stage

与 N3 处理大,这说明增加施氮量可以改善水分不足对冬小麦叶片光合作用的影响。所有光响应曲线在 PAR 高于 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,不同灌溉水平的光响应曲线间差距变大,这表明水分亏缺都会导致叶片对强光适应能力降低。

利用直角双曲线修正模型拟合光响应曲线计算出参数(表 4)。可以看出,不同水氮下光响应曲线拟合较好($R^2 > 0.9, P < 0.01$),均达到极显著水平,但不同灌溉量与施氮量对光响应曲线参数的效应不同。W2N2 处理 α 最高,说明 W2N2 对弱光的利用最强;在 W1 下 α 随施氮量的增加而降低,在 W2 与 W3 下 α 随施氮量的增加先增加后降低,说明适量

补水条件下,增施氮肥可以提高叶片对弱光的利用;在同一施氮水平下, α 随灌溉量的增加表现为先增后减的趋势,说明适量增加灌溉可提高旗叶对弱光的利用。 $P_{n,\text{max}}$ 在相同灌溉条件下均随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,N2 平均比 N1 与 N3 处理增加 13.1%、2.4%。在 W2 下减氮(N2)处理 $P_{n,\text{max}}$ 最高,说明减氮适水可提高净光合速率,过量灌溉和施氮反而会降低 $P_{n,\text{max}}$ 。同时,不同水氮处理对 R_d 和 $P_{n,\text{max}}$ 有相同的效应,说明减氮适水也增加了暗呼吸速率。而 W2N2 光补偿点最低,也表现出了较高的光合潜能。

可见,W2N2 处理可以提高冬小麦旗叶对光的

表 4 灌浆期不同处理旗叶光响应曲线的模拟参数

Tab. 4 Simulated parameters in light response curve of flag leaf under different treatments at filling stage						
处理	α	$P_{n,max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$R_d/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{LCP}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{LSP}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	R^2
W1N1	0.046	15.04	1.07	24.05	1 180.40	0.999
W1N2	0.033	18.73	0.99	30.16	1 452.77	0.999
W1N3	0.033	18.01	1.03	30.48	1 372.48	0.999
W2N1	0.059	17.08	0.99	17.07	1 109.74	0.996
W2N2	0.070	21.37	1.16	17.12	1 241.30	0.995
W2N3	0.051	20.10	1.06	21.04	1 199.83	0.999
W3N1	0.045	16.10	1.14	25.17	1 309.23	0.999
W3N2	0.062	21.19	1.28	26.06	1 348.79	0.995
W3N3	0.058	19.89	1.24	22.07	1 262.72	0.998

广幅适应能力,对提高光合能力具有明显的作用。

2.4 产量与光合特性、光响应参数的相关性分析

各处理冬小麦产量(图 6)表现出明显差异,W2 灌溉水平下的各施氮处理产量明显高于 W1 与 W3

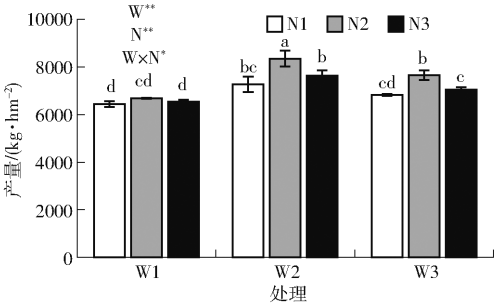


图 6 不同处理下的冬小麦产量

下相应处理,W2N2 处理产量最高。

相关分析表明(表 5)冬小麦产量与灌浆期的冬小麦叶片的 SPAD、光合特性有着很高的相关系数,与光响应参数中 α 、 $P_{n,max}$ 和 LCP 指标也存在一定相关性。产量与 SPAD 和 P_n 的相关系数高于其他参数的相关系数,说明灌浆期旗叶叶绿素含量和净光合速率对冬小麦光合产物的积累与转移影响相对较大,灌浆期可以通过水氮因素二者调节来提高冬小麦产量。另外,冬小麦产量会因旗叶 C_i 与 LCP 的增加而受到抑制。但产量与抽穗期冬小麦叶片的 SPAD、各光合特性均不相关,这表明灌浆期的水氮并未对产量造成显著影响,且进一步说明了灌浆水对产量影响显著。

表 5 产量与光合特性、光响应参数的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients of yield with photosynthetic characteristic and light response parameters										
生育期	SPAD	光合特性参数				光响应参数				
		P_n	T_r	G_s	C_i	α	$P_{n,max}$	R_d	LCP	LSP
抽穗期	0.324	0.391	0.415	0.428	-0.392					
灌浆期	0.981 **	0.892 **	0.853 **	0.860 **	-0.768 *	0.838 **	0.772 *	0.155	-0.794 **	-0.444

3 讨论

众多研究^[10-11]均表明,水氮具有协同作用,水分亏缺会抑制作物对养分的吸收,但水分过量又会带走大量养分;氮肥过少会降低作物产量,但过量提高产量的同时会造成土壤中残留大量氮,增加淋失风险。本研究中,足水高氮(W3N3)组合明显也不是最佳组合,因为 N3 处理会大量增加土壤剖面中 NO_3^- -N 含量,而灌溉量会显著加大 NO_3^- -N 淋洗损失,二者的组合会加剧 NO_3^- -N 淋失。具体表现为,在减水(W1)条件下,作物根区 NO_3^- -N 淋失量对 N 施用量并不敏感,足水(W3)条件下, NO_3^- -N 淋失量最高;而适水(W2)条件下,淋失量较 W3 处理显著降低,这与孙美^[12]的研究结果一致。JAHANGIR 等^[13]研究也表明,尽管矿物 N 在土壤剖面可以存

储,以备作物后期利用,但土壤剖面中硝酸盐大量的积累会导致 N 淋溶。同时,也有研究^[14]表明,适当减少氮肥投入在产量没有明显降低的情况下会减少 N 的淋失和残留,这与本研究在 W2 和 W3 条件下,N2 产量均高于 N3 且 NO_3^- -N 淋失量明显降低的试验结果相一致。根据产量与生态环境效应综合分析,本研究中 W2N2 处理可以在保证产量的基础上降低 NO_3^- -N 随灌水淋溶到深层土壤的风险。

为了实现作物高产、高水肥利用效率和生态环境保护,农学家们提出了土壤-作物综合系统管理^[15],以协调水肥的施用,实现产量与环境协调发展,本文的研究核心与此类研究理念相吻合。

众多研究^[16-18]显示,抽穗至灌浆期的冬小麦光合作用直接决定着产量,水、氮对冬小麦的光合生理

特性影响显著。本试验中,在分析冬小麦旗叶光合特性与产量的相关性中发现,在灌浆期旗叶的光合指标 P_n 、 T_r 、 G_s 与产量 Y 呈显著性正相关(表5),这与唐晓培等^[19]在研究产量与光合特性关系时结果一致。曹树青等^[20]发现,高产品种冬小麦灌浆期旗叶的光合功能持续高效,证明了光合与灌浆同步兴衰的观点。同样,在本研究中,W2N2处理的光合能力与产量均最高,这充分说明了灌浆期旗叶较强的光合能力对作物高产的重要性。

众多学者研究了水氮对冬小麦旗叶光合特性的影响。陈旭等^[21]、石珊珊等^[22]研究均表明水分亏缺使冬小麦旗叶叶绿素含量、光合速率下降,而适宜水分下旗叶光合性能得到显著改善,籽粒产量增加。本研究中,供水量495 mm(W3)和370 mm(W2)处理的SPAD、 P_n 、 T_r 显著高于供水量300 mm(W1)处理,表明低供水量下冬小麦叶片水分不足,导致气孔关闭,影响CO₂从空气到细胞内部的扩散, P_n 、 T_r 从而降低,这也与REDDY等^[23]研究结果一致。文献[24–26]研究表明,合理的施氮量能显著提高冬小麦叶片的光合速率,但过量施肥会导致灌浆后期叶片早衰,降低光合速率。该观点在本试验中同样得到了验证,高氮(N3)处理无论在足水(W3)还是

适水(W2)条件下均不能产生最佳的耦合效应,反而导致叶片光合性能下降。

在水氮互作对冬小麦光合速率的影响中,不同研究提出了各自的高光合速率组合^[6,16–17],但其核心内容均是合理适度灌溉和施氮,这与本研究提出的减氮适水的理念相吻合。

4 结束语

本试验条件下,冬小麦供水控制在适水(370 mm, W2)就可以满足冬小麦的生长需求。在此前提下,施氮量减量23%(N2,255 kg/hm²)可以显著提高冬小麦光合特性(P_n 、 T_r 、 G_s)、增加光合产物积累,从而提高了产量;此外,还可提高土壤蓄水的利用,增大土壤水分库容,使土壤NO₃⁻-N含量和淋失量保持在一个相对较低的水平。综合考虑水肥协同效应、光合特性、产量等多种冬小麦生长指标以及环境效应,华北平原节水灌溉农业生产的供水量和施肥量控制在370 mm(W2)、255 kg/hm²(N2)左右时比较适宜,该水肥组合可获得较高的产量,提高了水肥利用效率,可以作为研究区条件下冬小麦高效生产的参考依据,从而促进华北平原实现粮食生产与环境保护之间的平衡。

参 考 文 献

[1] 赵彦茜,肖登攀,齐永青,等. 华北平原不同降水年型和作物种植模式下的产量和耗水模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 108–116.
ZHAO Yanxi, XIAO Dengpan, QI Yongqing, et al. Crop yield and water consumption of different cropping patterns under different precipitation years in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 108–116. (in Chinese)

[2] 王慧军,张喜英. 华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(5): 724–733.
WANG Huijun, ZHANG Xiyang. Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion regions in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 724–733. (in Chinese)

[3] 胡春胜,张玉铭,秦树平,等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501–1514.
HU Chunsheng, ZHANG Yuming, QIN Shuping, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501–1514. (in Chinese)

[4] 张忠学,刘明,齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 284–291.
ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 284–291. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002031&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.031. (in Chinese)

[5] 周苏玫,张珂珂,张嫚,等. 减氮适墒提高冬小麦旗叶光合潜力和籽粒产量[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1677–1688.
ZHOU Sumei, ZHANG Keke, ZHANG Man, et al. Nitrogen-reducing and suitable soil moisture enhance photosynthetic potential of flag leaf and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(11): 1677–1688. (in Chinese)

[6] 吕广德,王超,靳雪梅,等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2593–2603.
LÜ Guangde, WANG Chao, JIN Xuemei, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2593–2603. (in Chinese)

[7] 张经廷,吕丽华,张丽华,等. 作物水肥耦合类型量化方法在华北冬小麦水氮配置中的应用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17): 2997–3007.
ZHANG Jingting, LÜ Lihua, ZHANG Lihua, et al. A novel method for quantitating water and fertilizer coupling types and its application in optimizing water and nitrogen combination in winter wheat in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(17): 2997–3007. (in Chinese)

[8] 史辛凯,石玉,赵俊晔,等. 施氮量对超高产小麦品种烟农1212耗水特性和籽粒产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(5): 72–75.
SHI Xinkai, SHI Yu, ZHAO Junye, et al. Effects of nitrogen application rate on water consumption characteristics and grain

- yield of super high-yielding wheat cultivar Yannong 1212[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(5): 72–75. (in Chinese)
- [9] 雷刚, 漆良华. 不同地被竹光响应曲线拟合及光合特性[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(4): 642–648.
LEI Gang, QI Lianghua. Photosynthesis-light response curve fitting and photosynthetic characteristics comparison of different ornamental dwarf bamboo resources[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(4): 642–648. (in Chinese)
- [10] 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92–96.
HAO Shurong, ZHENG Ji, FENG Yuanzhou, et al. After effects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 92–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130317&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.017. (in Chinese)
- [11] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 283–293.
YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 283–293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200732&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.032. (in Chinese)
- [12] 孙美. 华北平原作物产量与土壤氮素淋失对灌溉施肥的响应模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
SUN Mei. Simulation of crop yield and nitrogen leaching response to irrigation and fertilization in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [13] JAHANGIR M M R, KHALIL M I, JOHNSTON P, et al. Denitrification potential in subsoils: a mechanism to reduce nitrate leaching to groundwater[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 147(1): 13–23.
- [14] HARTMANN T E, YUE S C, SCHULZ R, et al. Yield and N use efficiency of a maize-wheat cropping system as affected by different fertilizer management strategies in a farmer's field of the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2015, 174(3–4): 30–39.
- [15] CHEN G, CHEN Y, ZHAO G, et al. Do high nitrogen use efficiency rice cultivars reduce nitrogen losses from paddy fields? [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 209: 26–33.
- [16] 马瑾, 罗珠珠, 牛伊宁. 水分和氮素水平对春小麦光合特性和水分利用的影响[J]. 作物研究, 2020, 34(4): 308–314.
MA Jin, LUO Zhuzhu, NIU Yining. Effects of water and nitrogen levels on photosynthetic characteristics and water utilization of spring wheat[J]. Crop Research, 2020, 34(4): 308–314. (in Chinese)
- [17] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 301–308.
WANG Lei, DONG Shuting, LIU Peng, et al. Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 301–308. (in Chinese)
- [18] 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.
ZHANG Keke, ZHOU Sumei, ZHANG Man, et al. Effects of reduced nitrogen application and supplemental irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield in high-yield populations of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 863–872. (in Chinese)
- [19] 唐晓培, 杨丽, 冯冬雪, 等. 非充分灌溉下8个小麦品种旗叶光合与产量及水分利用效率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 245–252, 265.
TANG Xiaopei, YANG Li, FENG Dongxue, et al. Relationship between flag leaves photosynthesis and yield, water use efficiency of eight wheat varieties under deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 245–252, 265. (in Chinese)
- [20] 曹树青, 赵永强, 温家立, 等. 高产小麦旗叶光合作用及与籽粒灌浆进程关系的研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 19–25.
CAO Shuqing, ZHAO Yongqiang, WEN Jiali, et al. Studies on photosynthesis in flag leaves and its relation to grain filling course of high yield wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(6): 19–25. (in Chinese)
- [21] 陈旭, 郝明德, 许晶晶, 等. 干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 159–163, 169.
CHEN Xu, HAO Mingde, XU Jingjing, et al. Effect of drought stress on photosynthesis characteristics in flag leaf of wheat cultivars in different years in the central Shaanxi plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 159–163, 169. (in Chinese)
- [22] 石珊珊, 周苏玫, 尹钧, 等. 高产水平下水肥耦合对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 549–554.
SHI Shanshan, ZHOU Sumei, YIN Jun, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of winter wheat under high yield condition[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(3): 549–554. (in Chinese)
- [23] REDDY A R, CHAITANYA K V, VIVEKANANDAN M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11): 1189–1202.
- [24] KOCH B, KHOSL R, FRASIER W M, et al. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(6): 1572–1580.
- [25] 王贺正, 张均, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特性和产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 69–75.
WANG Hezheng, ZHANG Jun, WU Jinzhi, et al. Effect of different levels of nitrogen on physiological characteristics of flag leaves and grain yield of wheat[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 69–75. (in Chinese)
- [26] 孙旭生, 林琪, 李玲燕, 等. 氮素对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 840–844.
SUN Xusheng, LIN Qi, LI Lingyan, et al. Effects of nitrogen supply on photosynthetic characteristics at later developing stages and yield in superhigh-yield winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008, 14(5): 840–844. (in Chinese)