

化肥减施对滴灌冬小麦灌浆期光合生理特性的影响

丛孟菲¹, 赖宁³, 胡洋¹, 吴江红¹, 马雯琪¹, 孙霞^{1, 2*}, 陈晔³, 贾宏涛^{1, 2}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:以“新冬22号”为试验材料,开展了化肥减施对滴灌冬小麦灌浆期光合生理特征变化的影响研究。田间试验在新疆农业科学院奇台麦类试验站开展,分别设置CF(常规施肥)、N4P2、N3P2、N3P1、N2P1、N1P1、N0P1(不施N)、N3P0(不施P₂O₅)、N0P0(不施肥)9个施肥处理。研究冬小麦在灌浆期的株高、旗叶SPAD值、旗叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)、胞间CO₂浓度(C_i)、光能利用效率(E_u)、瞬时水分利用效率(WUE)以及成熟期产量的差异。结果表明:(1)冬小麦的株高、旗叶SPAD值随着氮、磷施用量的减少呈现先平缓后显著降低的趋势;其中CF、N4P2、N3P2、N3P1处理间无显著差异。而产量随着氮、磷施用量的减少呈现先增加后平缓的趋势,继续减施则产量降低,当施N、P₂O₅量分别减少为240和120 kg/hm²时产量最高。(2)冬小麦旗叶的P_n、G_s、Tr、C_i、E_u、WUE随着氮、磷施用量的减少呈现先平缓后显著降低的趋势。(3)当施N、P₂O₅量减少为240和120 kg/hm²时,灌浆期株高、SPAD值、产量、光合生理指标仍无显著降低,且施N较施P₂O₅处理对冬小麦的影响更大。综上,合理的氮、磷施用量可提高灌浆期冬小麦旗叶的叶绿素含量,并通过光合作用促进冬小麦生长和产量增加,但过量的氮、磷施用量并未促进冬小麦的生长和产量增加;施N量为240 kg/hm²、施P₂O₅量为120 kg/hm²能够保证小麦的正常生长,并且维持高产。

关键词:化肥减施;冬小麦;光合生理特征

小麦是我国重要的粮食作物^[1]。灌浆期是小麦生育期中极其重要的时期,其生长状况和持续时间决定了小麦籽粒的品质^[2-3]。施用化肥可提高小麦产量、改善小麦品质^[4]。但过量施肥,不仅会降低小麦的产量和品质,还会使得大量的化肥残留于土壤中,引起水体富营养化和大气污染等一系列环境问题,严重影响生态环境^[5-6]。故合理施用化肥、减少养分流失、减轻环境污染成为了当前研究的热点。合理的施肥量可提高小麦的光合特性,利于光合产物的积累与分配,促进小麦的生长^[7]。光合作用是作物生产的基础^[8],叶片是光合作用的主要器官,尤其是在灌浆期小麦的功能叶片,其光合性能的改善对促进小麦生长和提高小麦产量起着

至关重要的作用^[9]。叶绿素是植物进行光合作用的重要色素分子,参与作物光合作用,是反映植物光合能力的重要指标之一^[10]。有学者研究发现,小麦产量中90%~95%的贡献率来自光合作用,而功能叶片的光合产物对产量的贡献率可达80%^[11]。由此可见,光合作用对小麦的生长发育具有重要作用。氮和磷是小麦生长发育所必需的重要元素,对小麦光合作用有重要的调节作用。赵海波等^[12]认为,小麦旗叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及SPAD值随着施氮和施磷量的增加而增大,但过高的施肥量(P₂O₅ 225 kg/hm²)导致小麦生育后期旗叶衰老加快,光合生理指标迅速衰退;孙旭生等^[13]研究表明,随着施氮量的增加,小麦的净光合速率增强,但过高的施氮量(N 375 kg/hm²)导致灌浆后期叶片快速衰老,净光合速率迅速下降。合理施用氮、磷肥可有效提高小麦的光合作用、SPAD值和生长状况。总之,前人对不同施肥量下小麦的光合特征进行了大量的研究,但是在西北干旱区麦田土壤上减施化肥对冬小麦生长和光合特性的研究较少。

收稿日期: 2021-01-27; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200406); 农业农村部专项资金“耕地质量等级调查评价”。

作者简介: 丛孟菲(1995-), 硕士研究生, 研究方向为植物营养学。E-mail: 571408679@qq.com。

通讯作者: 孙霞, E-mail: sunxia1127@163.com。

为此,本研究选取冬小麦为研究材料,在新疆农业科学院奇台麦类试验站,通过田间试验,设置不同的化肥减施量,利用冬小麦的株高、SPAD值、产量和光合生理特征来分析不同氮、磷施用量对灌浆期冬小麦生长的影响,旨在从光合生理特征的角度阐述灌浆期冬小麦对化肥用量的响应特征,为找出冬小麦最适施肥量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验设置在新疆农业科学院奇台麦类试验站,地理位置为 $89^{\circ}44'48''\text{E}$, $43^{\circ}59'6''\text{N}$,位于天山北麓,准噶尔盆地东南缘。属中温带大陆性干旱气候,年平均气温 5.5°C ,极端最高气温 39°C ,极端最低气温 -37.3°C ,无霜期年平均153 d,年平均降水量 269.4 mm ^[14]。该研究区土壤类型为灰漠土,土壤pH为8.53,电导率为 $233.00\ \mu\text{S}/\text{cm}$,有机质 $16.61\text{ g}/\text{kg}$,全氮 $0.94\text{ g}/\text{kg}$,碱解氮 $34.6\text{ mg}/\text{kg}$,有效磷 $19.3\text{ mg}/\text{kg}$ 。

1.2 试验设计

调查当地多家农户在冬小麦上的化肥施用量,其中当地农户平均施氮量约为 $315\text{ kg}/\text{hm}^2$,平均施磷量约为 $180\text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[15],当地推荐施氮量约为 $240\text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[16],推荐施磷量为 $120\text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[17]。据此本研究设置了9个化肥减施处理,其中CF为农户常规施肥处理,N4P2为在CF的基础上减施14%的N和23%的 P_2O_5 处理,N3P2处理表示在CF基础上减施24%的N和23%的 P_2O_5 ,N3P1为优化施肥处理,相比CF减施24%的N和33%的 P_2O_5 ,N2P1处理表示在CF基础上减施33%的N和33%的 P_2O_5 ,N1P1处理表示在CF基础上减施43%的N和33%的 P_2O_5 ,NOP1为不施N处理,N3P0为不施 P_2O_5 处理,NOP0为空白对照,各处理具体施肥量见表1。每个处理重复3次,共27个试验小区,小区采取随机排列的方式,每个小区面积为 176 m^2 ($8\text{ m}\times 22\text{ m}$),每小小区间有1 m的保护行。于2019年9月20日播种,播种量为 $300\text{ kg}/\text{hm}^2$,品种为“新冬22号”,2020年7月2日收获,滴灌带布置为1管4行(4行小麦1条滴灌带,行距为15 cm)。生育期共灌溉8次,总灌水量 $4050\text{ m}^3/\text{hm}^2$;氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(P_2O_5 46%),钾肥为硫酸钾(K_2O 51%),其中30%的氮肥、全部磷肥和全部钾肥作为基肥,在小

麦播种前施入,70%氮肥作为追肥随水滴施,其中15%在返青期追施,20%在拔节期追施,20%在孕穗期追施,15%在灌浆期追施。其他各项管理与大田生产相同,无明显病虫害草害。

表1 试验处理

处理	施肥量 (kg/hm^2)		
	N	P_2O_5	K_2O
CF	315	180	20
N4P2	270	138	20
N3P2	240	138	20
N3P1	240	120	20
N2P1	210	120	20
N1P1	180	120	20
N0P1	0	120	20
N3P0	240	0	20
N0P0	0	0	0

1.3 指标测定及方法

1.3.1 冬小麦株高、SPAD值的测定

灌浆期时测定小麦的株高、SPAD值。每个小区随机选择长势一致的冬小麦5株,使用钢卷尺测量冬小麦自然株高,使用便携式SPAD-502叶绿素仪测定冬小麦旗叶的SPAD值。

1.3.2 冬小麦光合生理特征的监测

灌浆期时监测冬小麦的光合生理指标,在10:00~13:00期间,每个小区随机选取长势一致的冬小麦3株,使用便携式CIRAS-2光合仪监测冬小麦旗叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)以及胞间 CO_2 浓度(Ci)。

1.3.3 产量测定

收获期时各试验小区随机取 1 m^2 的样方,割方计算单位面积产量(换算为12.5%标准含水量下的产量)。

1.4 数据处理

采用Excel 2010对数据进行统计、整理,采用SPSS 22.0对数据进行单因素方差分析(ANOVA),多重比较(LSD)进行数据显著性分析,采用Origin 2018进行作图。

光能利用效率的计算^[18]:

$$\text{Eu}(\%) = (0.47 \times \text{Pn}/\text{PAR}) \times 100$$

$$\text{WUE}(\%) = \text{Pn}/\text{Tr}$$

式中, Eu为光能利用效率, WUE为瞬时水分利用效率, Pn为净光合速率, PAR为光照强度, Tr为

蒸腾速率。

2 结果与分析

2.1 化肥减施对灌浆期冬小麦株高的影响

由图 1 可以看出, 灌浆期冬小麦的株高随着施肥量的减少呈现先平缓再下降的趋势。CF、N4P2、N3P2、N3P1 处理间无显著差异 ($P>0.05$), 株高最高为 76.53 ~ 78.35 cm。其余处理冬小麦的株高均显著降低 ($P<0.05$), 株高在 64.50 ~ 72.25 cm 之间。其中, N2P1、N1P1 与 N3P0 处理间无显著差异。说明氮、磷肥从 CF (N 315 kg/hm²、P₂O₅ 180 kg/hm²) 减施至 N3P1 处理 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²) 时对灌浆期冬小麦的株高仍无显著影响, 继续减施氮、磷则小麦的株高显著降低, 不施磷肥处理显著高于不施氮肥处理的小麦株高。

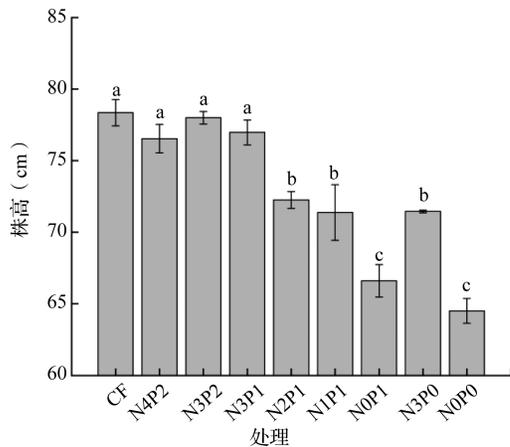


图 1 不同处理冬小麦株高

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 化肥减施对灌浆期冬小麦 SPAD 值的影响

由灌浆期冬小麦 SPAD 值的变化 (图 2) 可以

看出, CF、N4P2、N3P2、N3P1、N3P0 处理间冬小麦旗叶 SPAD 值无显著差异 ($P>0.05$), SPAD 值最高在 51.50 ~ 51.90 之间。其余处理较 CF 相比均显著降低 ($P<0.05$), SPAD 值在 47.13 ~ 50.23 之间。N0P1 与 N0P0 处理的 SPAD 值较小。说明氮、磷肥从 CF (N 315 kg/hm²、P₂O₅ 180 kg/hm²) 减施至 N3P1 处理 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²) 对灌浆期冬小麦的 SPAD 值仍无显著影响, 继续减施氮、磷, 小麦的 SPAD 值则显著降低, 不施磷肥处理显著高于不施氮肥处理的小麦 SPAD 值。

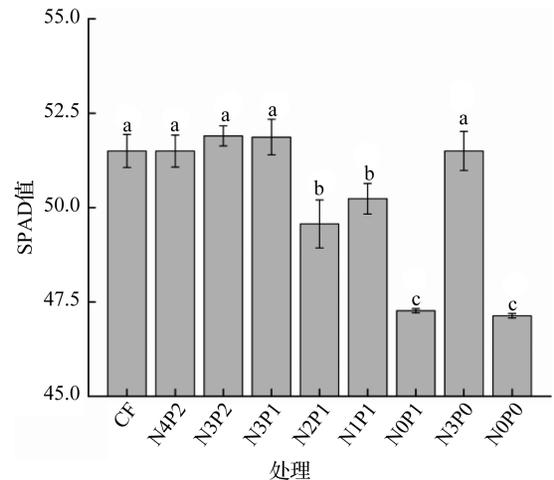


图 2 不同处理冬小麦 SPAD 值

2.3 化肥减施对灌浆期冬小麦光合生理特征的影响

由图 3 可以看出, N4P2、N3P2、N3P1 处理灌浆期冬小麦旗叶的净光合速率较 CF 相比无显著差异 ($P>0.05$), 在 19.73 ~ 20.25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间。其余处理冬小麦旗叶净光合速率较 CF 相比均显著降低 ($P<0.05$), 在 14.60 ~ 18.72 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间。

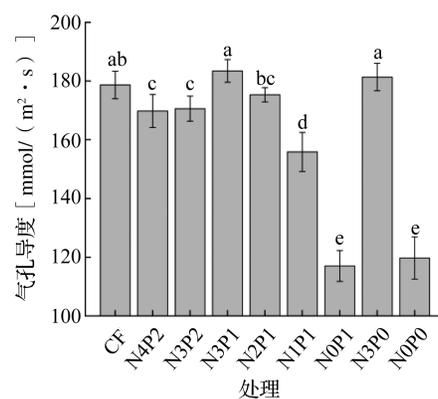
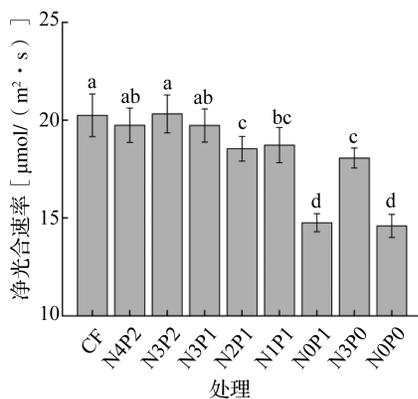


图 3 不同处理冬小麦净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)

其中, N0P1 与 N0P0 之间无显著差异 ($P>0.05$)。从冬小麦旗叶气孔导度的变化可以看出, N3P1 和 N3P0 处理与 CF 相比无显著差异 ($P>0.05$), 气孔导度在 $178.7 \sim 185.3 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间; 其余处理均显著降低了气孔导度 ($P<0.05$), 其中, N0P1 与 N0P0 之间无显著差异 ($P>0.05$)。

从冬小麦蒸腾速率的变化 (图 4) 可以看出, N4P2 和 N3P2 处理与 CF 相比无显著差异 ($P>0.05$),

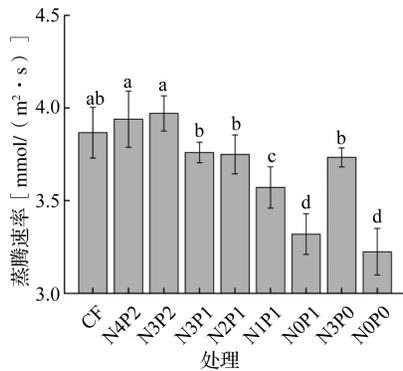
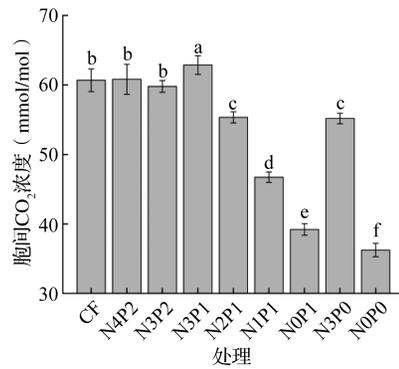


图 4 不同处理冬小麦蒸腾速率 (Tr)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci)



从冬小麦旗叶光能利用效率的变化 (图 5) 可以看出, 冬小麦旗叶的光能利用效率随着施肥量的减少呈现先平缓后降低的趋势, N4P2 和 N3P2 处理与 CF 相比无显著差异 ($P>0.05$), 光能利用效率在 $0.61\% \sim 0.64\%$ 之间, 其余处理均显著降低了冬小麦旗叶的光能利用率 ($P<0.05$), 其中, N0P1 与 N0P0

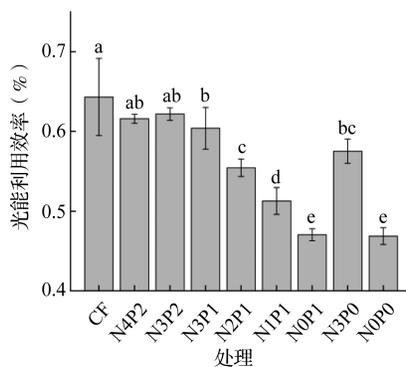
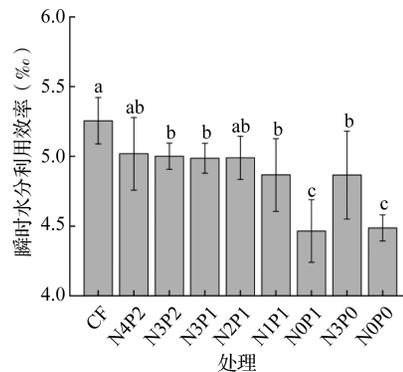


图 5 不同处理冬小麦光能利用效率 (Eu) 和瞬时水分利用效率 (WUE)

蒸腾速率在 $3.86 \sim 3.97 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 其余处理显著降低了小麦旗叶的蒸腾速率 ($P<0.05$), 蒸腾速率在 $3.25 \sim 3.75 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 其中, N0P1 与 N0P0 之间无显著差异 ($P>0.05$)。从冬小麦旗叶的胞间 CO₂ 浓度变化可以看出, 冬小麦的胞间 CO₂ 浓度随着施肥量的减少呈现先增高后降低的趋势, 其中, N3P1 处理冬小麦旗叶的胞间 CO₂ 浓度最高, 为 $62.85 \text{ mmol}/\text{mol}$ 。

之间无显著差异 ($P>0.05$)。从冬小麦旗叶瞬时水分利用效率的变化可以看出, 与 CF 相比, N4P2 与 N2P1 处理间无显著差异 ($P>0.05$), 瞬时水分利用效率在 $4.98\% \sim 5.25\%$ 之间, 其余处理显著降低了冬小麦旗叶的瞬时水分利用效率 ($P<0.05$), 其中 N0P1 与 N0P0 之间无显著差异 ($P>0.05$)。



2.4 化肥减施对冬小麦千粒重、产量和籽粒容重的影响

从冬小麦产量、千粒重和籽粒容重的变化 (表 2) 可以看出, 冬小麦产量随着施氮、磷量的减少呈现先增高后平缓再降低的趋势。N3P1 处理的产量最高, 达到了 $10881.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。但 N4P2、N3P2、N3P1 和 N2P1 处理间无显著差异, 产量在

$9960.4 \sim 10881.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间。与 CF 相比, N3P2 和 N3P1 处理显著增加了冬小麦的产量, 分别增加了 14.58% 和 16.31% 。与 CF 相比, N3P0 和 N0P0 处理显著降低了冬小麦产量, 分别降低了 7.91% 和 10.82% 。从不同处理冬小麦千粒重和籽粒容重的变化可以看出, 冬小麦千粒重和籽粒容重无显著变化。

表 2 不同处理冬小麦千粒重、产量和籽粒容重

处理	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	籽粒容重 (g/L)
CF	48.71 ± 3.96ab	9355.4 ± 1159.9bc	813.0 ± 8.2a
N4P2	45.73 ± 3.54b	10172.3 ± 132.9ab	800.7 ± 22.2a
N3P2	46.26 ± 0.93b	10719.2 ± 1083.6a	814.0 ± 8.9a
N3P1	48.51 ± 2.73ab	10881.0 ± 237.2a	814.0 ± 6.9a
N2P1	51.03 ± 1.40a	9960.4 ± 448.6ab	831.0 ± 4.6a
N1P1	48.79 ± 3.20ab	9365.7 ± 572.4bc	832.0 ± 43.6a
N0P1	51.96 ± 1.39a	9173.5 ± 118.3bc	819.3 ± 17.8a
N3P0	48.81 ± 2.64ab	8615.0 ± 270.6c	809.7 ± 15.0a
N0P0	50.02 ± 0.40ab	8342.8 ± 173.7c	827.0 ± 19.1a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, $n=3$)。

2.5 灌浆期冬小麦株高、SPAD 值、产量与光合指标的相关分析

由表 3 可知, 灌浆期冬小麦株高、SPAD 值、Pn、Gs、Tr、Ci、Eu 和 WUE 之间均呈显著正相关关系, 其中株高与 SPAD 值、Tr、Ci、Eu 呈极显著正相关关系。SPAD 值与 Pn 呈极显著正相关关系,

Pn 与 Gs、WUE 呈极显著正相关关系。Gs 与 Tr、Ci、WUE 呈极显著正相关关系。Tr 与 Eu、Ci 呈极显著正相关关系。Ci 与 Eu 呈极显著正相关关系。而产量与株高、Pn、Tr、Ci 呈显著正相关关系。千粒重与株高、SPAD 值、Pn、Tr、Eu 之间呈显著负相关关系。容重与各指标无显著相关。

表 3 植物株高、SPAD 值、产量与光合指标之间的相关分析

	株高	SPAD 值	Pn	Gs	Tr	Ci	Eu	WUE	产量	千粒重	籽粒容重
株高	1										
SPAD 值	0.916**	1									
Pn	0.966**	0.941**	1								
Gs	0.819**	0.919**	0.879**	1							
Tr	0.943**	0.920**	0.947**	0.871**	1						
Ci	0.952**	0.934**	0.934**	0.924**	0.953**	1					
Eu	0.963**	0.919**	0.919**	0.857**	0.949**	0.962**	1				
WUE	0.924**	0.866**	0.950**	0.882**	0.905**	0.909**	0.920**	1			
产量	0.751*	0.598	0.700*	0.507	0.680*	0.717*	0.612	0.546	1		
千粒重	-0.712*	-0.761*	-0.717*	-0.517	-0.738*	-0.649	-0.716*	-0.568	-0.497	1	
籽粒容重	-0.545	-0.579	-0.411	-0.406	-0.572	-0.585	-0.655	-0.369	-0.279	0.647	1

注: * 表示相关性显著 ($P < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 化肥减施对冬小麦生长和产量的影响

小麦株高决定着小麦的干物质积累和贮藏能力, 是反映小麦生长状况的一项重要指标^[19]。叶

绿素是植物光合作用的主要色素, 在光合作用中起着至关重要的作用, SPAD 值可间接反映出小麦的叶绿素含量。目前大量研究发现, 在一定范围内增施氮、磷肥会促进小麦的生长, 但是施肥过量不会促进生长甚至会抑制小麦的生长^[20-21]。本研究

滴灌冬小麦的表现与此一致,本研究冬小麦在灌浆期的株高与 SPAD 值随着施氮、磷量的减少呈现先平稳后降低的趋势,且氮、磷减施为 N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 时冬小麦的株高、SPAD 值仍无显著降低,继续减施 N 则显著降低。本研究还发现不施氮肥处理对冬小麦株高和 SPAD 值的影响较大,而不施磷肥的影响较小。

从冬小麦产量的变化可以看出, N4P2、N3P2、N3P1、N2P1 处理的产量较高,且它们之间无显著差异,产量达到了 9960.4 ~ 10881.0 kg/hm²,其中 N3P1 (N240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²) 处理产量最高。由此可以看出,产量随着减施氮、磷量的增大呈现先增加后平缓的趋势,当减施量过大时产量则会降低,这与前人研究结果类似^[22-23]。

3.2 化肥减施对冬小麦光合生理特征的影响

光合作用是植物生长发育的基础,为植物的生长发育提供能量和物质需求^[24]。净光合速率是评价植物光合能力的一个重要指标,净光合速率越高,表明植物进行光合作用的能力越强。气孔导度是表示气孔运动状态的一项生理指标,而气孔是植物与外界大气进行交换的主要通道。蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、光能利用效率和瞬时水分利用效率则是植物重要的生理活动和指标^[25]。有研究发现,小麦生育后期旗叶的光能吸收和利用功能是小麦生长发育的主要部位,故研究小麦旗叶的光合生理意义重大^[26]。还有研究发现,植物的光合作用与化肥的施用量有着非常密切的关系,合理的施氮量有利于小麦灌浆期维持高的光合作用,提高小麦的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度,促进光能向化学能转化,促进小麦的生长^[27]。还有研究发现,磷肥对小麦旗叶光合速率也有一定的影响,合理施用磷肥可有效提高小麦旗叶的 SPAD 值和净光合速率,磷肥缺乏或过量又会使旗叶的 SPAD 值和净光合速率下降^[28-30]。本研究中,冬小麦在灌浆期旗叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、光能利用效率和水分利用效率均随着施氮、磷量的减少呈现先平缓后降低的趋势,在氮、磷量减施为 N3P1 处理 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²) 时灌浆期冬小麦仍保持较高的光合作用,继续减施氮肥则显著降低了小麦的光合生理指标。

3.3 化肥减施条件下冬小麦生长、产量和光合生理指标的相关性

通过相关性分析可知,冬小麦在灌浆期的株

高、旗叶 SPAD 值、光合生理指标、产量和千粒重之间均有一定的相关性。有研究表明,小麦的光合作用与生长发育有直接关系^[31],影响光合速率的主要原因是小麦的叶绿素含量^[32],叶绿素是光合色素中的重要色素分子,参与光合作用中光能的吸收、传递和转换等过程,在光合作用中占有重要地位^[33]。气孔导度影响着小麦叶片的蒸腾和光合过程,气孔导度与蒸腾速率调控着小麦旗叶的水分散失和 CO₂ 同化,从而影响小麦的光合作用。施用化肥会影响灌浆期冬小麦旗叶的叶绿素含量,通过光合作用进而影响冬小麦的代谢过程,最终影响冬小麦的生长和产量。

综上,随着氮、磷肥的减施,冬小麦在灌浆期的株高、SPAD 值以及光合生理指标均呈现先平缓后降低的趋势,且氮、磷减施为 N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 时,灌浆期冬小麦仍保持较高的株高、旗叶 SPAD 值和光合生理指标。说明,在施 N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 条件下,能够保证小麦的正常生长,并且维持高产。

4 结论

施 N 量从 315 kg/hm² 减施至 240 kg/hm²,施 P₂O₅ 量从 180 kg/hm² 减施至 120 kg/hm² 时,冬小麦在灌浆期株高、SPAD 值、产量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、光能利用效率和瞬时水分利用效率仍无显著降低,继续减施 N,小麦的株高、SPAD 值和光合生理指标则显著降低,其中不施 N 对小麦的影响较不施 P₂O₅ 的影响更大。当施 N 量为 240 kg/hm²,施 P₂O₅ 为 120 kg/hm² 时产量最高。氮、磷的减施会影响灌浆期冬小麦的旗叶的叶绿素含量,并通过光合作用影响冬小麦的代谢,最终影响冬小麦的生长和产量。当施 N 量减施为 240 kg/hm²,施 P₂O₅ 量减施为 120 kg/hm² 时,仍能保证冬小麦正常生长,并且维持高产,此氮、磷施用量可能是研究区滴灌冬小麦较优的氮磷施肥配比。

参考文献:

- [1] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展 [J]. 作物杂志, 2018 (4): 1-7.
- [2] Pinthus M J, Shalom S Y. Day matter accumulation in the grains of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in grain weight [J]. Annals of Botany, 1978, 42: 469-471.
- [3] Wiegand C L, Cuellar J S. Duration of grain filling and kernel

- weight of wheat as affected by temperature [J]. *Crop Science*, 1981, 21: 95-101.
- [4] Wang M, Shen Q R, Xu G H, et al. Chapter one—new insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells [J]. *International Review of Cell & Molecular Biology*, 2014, 310: 1-37.
- [5] Zhang H Y, Hu K L, Zhang L J, et al. Exploring optimal catch crops for reducing nitrate leaching in vegetable greenhouse in North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 273-282.
- [6] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37 (7): 1008-1017.
- [7] 李娜, 张保军, 张正茂, 等. 不同施氮量和播量对“普冰151”干物质积累特征及籽粒灌浆特性的影响 [J]. *西北农业学报*, 2017, 26 (5): 693-701.
- [8] Calvin M. Photosynthesis as a resource for energy and materials [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1976, 23 (6): 425-444.
- [9] Richards R A. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51 (1): 447-458.
- [10] Guo W X, Zhao Z J, Zheng J, et al. Interaction of soil water and nitrogen on the photosynthesis and growth in *Pinus tabulaeformis* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53 (4): 37-48.
- [11] 陈天鑫, 王艳杰, 张燕, 等. 不同施氮量对冬小麦光合生理指标及产量的影响 [J]. *作物杂志*, 2020 (2): 88-96.
- [12] 赵海波, 林琪, 孙旭生, 等. 氮磷配施对济麦22花后光合特性及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2009, 29 (4): 663-667.
- [13] 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.
- [14] 周勃, 赖宁, 陈署晃, 等. 施氮量对滴灌冬小麦产量及氮素利用的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (4): 61-64.
- [15] 李青军, 赖宁, 陈署晃, 等. 不同灌溉方式下冬小麦和春小麦施肥现状与评价 [J]. *新疆农业科学*, 2016, 53 (5): 893-900.
- [16] 赖宁, 耿庆龙, 李青军, 等. 基于RapidSCAN CS-45的新疆滴灌冬小麦氮肥推荐研究 [J]. *麦类作物学报*, 2021, 41 (4): 96-104.
- [17] 新疆维吾尔自治区奇台县质量技术监督局. 滴灌小麦丰产管理技术规程 (DBN652325/T 043-2017) [S].
- [18] 王丽萍, 张凯, 贾宏涛, 等. 生物炭对原油污染土壤中苏丹草光合生理特征的影响 [J]. *新疆农业大学学报*, 2019, 42 (1): 59-64.
- [19] 朱新开, 郭文善, 李春燕, 等. 小麦株高及其构成指数与产量及品质的相关性 [J]. *麦类作物学报*, 2009, 29 (6): 1034-1038.
- [20] 刘艳妮, 马臣, 于昕阳, 等. 渭北旱塬兼顾冬小麦产量和环境效益的农田适宜氮肥用量 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (8): 2509-2516.
- [21] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 长江流域稻麦轮作条件下冬小麦适宜施氮量 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (9): 3015-3022.
- [22] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (7): 1558-1567.
- [23] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (11): 1827-1834.
- [24] 肖璞, 刘虎虎, 王翀, 等. 植物高光效研究进展 [J]. *生物学杂志*, 2020, 37 (2): 88-91.
- [25] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] 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.
- [27] 王罗秀. 微喷带灌溉条件下施氮量对小麦光合特性和氮素利用特性的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [28] Fredeen A L, Raab T K, Rao I M, et al. Effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Glycine max* (L.) Merr [J]. *Planta*, 1990, 181 (3): 399-405.
- [29] 岳俊芹, 李向东, 邵运辉, 等. 氮钾固定配施下施磷量对小麦光合、干物质转运及产量形成的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2020, 40 (4): 473-481.
- [30] 黄彩霞, 柴守玺, 赵德明, 等. 氮磷肥配施对冬小麦灌浆期光合参数及产量的影响 [J]. *植物学报*, 2015, 50 (1): 47-54.
- [31] Kalaji H M. Cancehlorophyll a fluorescence parameters be used as bio-indicators to distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill [J]. *Environ Exp Bot*, 2017 (11): 149-157.
- [32] Pu G Z, Zhang D A, Zeng D J, et al. Physiological response of *Arundo donax* L. to thallium accumulation in a simulated wetland [J]. *Mar Freshwater Res*, 2018, 69 (5): 714-720.
- [33] 邵瑞鑫. 长期施氮对小麦光合特性及土壤呼吸的调控机制 [D]. 北京: 中国科学院, 2011.

Effects of chemical fertilizer reduction on photosynthetic physiological characteristics of winter wheat at grain filling stage under drip irrigation

CONG Meng-fei¹, LAI Ning³, HU Yang¹, WU Jiang-hong¹, MA Wen-qi¹, SUN Xia^{1, 2*}, CHEN Shu-huang³, JIA Hong-tao^{1, 2} (1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052; 2. Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes of Xinjiang, Urumqi Xinjiang 830052; 3. Research Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi Xinjiang 830091)

Abstract: Taking “Xindong 22” as the experimental material, the effect of fertilizer reduction on the changes of photosynthetic physiological characteristics of winter wheat during the filling period was studied. The field experiment was carried out at the Qitai Wheat Test Station of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences. Nine fertilization treatments including CF (conventional fertilization), N4P2, N3P2, N3P1, N2P1, N1P1, N0P1 (no N), N3P0 (no P₂O₅), and N0P0 (no fertilizer) were set up, respectively. The plant height, flag leaf SPAD values, the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), intercell CO₂ concentration (Ci), light energy use efficiency (Eu), instantaneous water use efficiency (WUE) and yield of spring wheat in the filling stage were studied. The results showed as follows: (1) The plant height and flag leaf SPAD values of winter wheat showed a gentle trend at first and then significantly decreased with the decrease of N and P application rates; There was no significant difference between CF, N4P2, N3P2 and N3P1 treatments. However, with the decrease of N and P application rates, the yield increased first and then leveled off, and the highest yield was obtained when the application rate of N and P₂O₅ decreased to 240 and 120 kg/hm², respectively. (2) The Pn, GS, Tr, Ci, Eu and WUE of flag leaves of winter wheat showed a gentle trend at first and then decreased significantly with the decrease of nitrogen and phosphorus application rates. (3) When the application of N and P₂O₅ was reduced to 240 and 120 kg/hm², respectively, the plant height, SPAD value, yield and photosynthetic physiological indexes did not significantly decrease at the grain filling stage, and the effect of N application was greater than that of P₂O₅ treatment. In conclusion, reasonable application of N and P can increase the chlorophyll content of flag leaves of winter wheat at grain filling stage, and promote the growth and yield of winter wheat through photosynthesis, but excessive application of N and P does not promote the growth and yield of winter wheat. Under the condition of N 240 kg/hm² and P₂O₅ 120 kg/hm², the normal growth and high yield of wheat could be guaranteed.

Key words: fertilizer application reduction; spring wheat; photosynthetic physiological characteristics