

# 减氮节水对宁夏引黄灌区春小麦光合特性与产量的影响

马永鑫<sup>1</sup>, 王西娜<sup>2</sup>, 韦广源<sup>1</sup>, 薛旭<sup>2</sup>, 郝雯悦<sup>2</sup>, 王朝辉<sup>3</sup>, 谭军利<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学农学院, 银川 750021;  
3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 针对宁夏引黄灌区春小麦生产中氮肥投入过量及水资源利用效率低的问题, 探究减氮背景下节水灌溉对春小麦群体动态、光合特性及产量的影响。2021年以宁春4号为供试材料, 分别设置3个施氮水平(常规施氮270 kg/hm<sup>2</sup>、减施氮肥25%和不施氮)和3个灌溉定额(常规灌溉400 mm、节水20%和节水40%)。结果表明: 1) 同一氮肥水平下不同灌溉处理的群体总茎数均无显著性差异; 同一灌溉定额水平下常规施氮和减氮水平处理的群体总茎数均显著高于不施氮处理, 但二者无显著差异, 减氮节水处理亦能维持较高的群体总茎数和茎蘖成穗率。2) 与常规施氮相比, 减氮25%对春小麦的生长发育无明显影响, 在此基础上节水20%并不会降低春小麦株高, 叶面积的生长, 不会减少春小麦干物质累积量。3) 减氮水平与常规施氮处理的春小麦叶片SPAD值和光合指标无明显差异, 减氮水平下节水20%处理的叶片SPAD值和光合指标同常规灌溉无显著差异, 但显著高于节水40%处理。4) 所有水氮处理中减氮水平下20%节水处理的穗粒数和千粒质量最高, 春小麦产量达8 092.52 kg/hm<sup>2</sup>, 与常规施氮常规灌溉处理的产量无显著差异。减氮25%节水20%处理的灌溉施肥模式, 既可获得较高产量又可以节约水氮资源, 达到了宁夏引黄灌区春小麦生产中减氮、节水、稳产的目的。因此, 可作为当地适宜的施氮灌溉方案。

**关键词:** 氮; 灌溉; 肥料; 春小麦; 减氮节水; 群体动态; 产量; 宁夏引黄灌区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.010

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0075-10

马永鑫, 王西娜, 韦广源, 等. 减氮节水对宁夏引黄灌区春小麦光合特性与产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 75-84. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.010 http://www.tcsae.org

Ma Yongxin, Wang Xina, Wei Guangyuan, et al. Effects of nitrogen reduction and water saving on the photosynthetic characteristics and yield of spring wheat in the Yellow River Irrigation Areas of Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 75-84. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.010 http://www.tcsae.org

## 0 引言

宁夏引黄灌区光热资源丰富, 是中国春小麦优势产区, 所产春小麦的容重、硬度以及千粒质量等品质指标达到了中上等的水平, 对宁夏的粮食贡献率较高。然而, 该区域春小麦生产过程中普遍采用“大水大肥”的水肥管理方式。据调查, 在2011—2013年宁夏引黄灌区春小麦, 氮肥投入过量的农户占86.4%<sup>[1]</sup>; 2018—2019年高达97.1%<sup>[2]</sup>。过量施用氮肥和大水漫灌方式使得土壤中硝态氮大量累积以及多余的氮素通过淋溶、挥发、反硝化等途径损失, 既造成水氮利用效率低, 又引起土壤质量、地下水及大气的环境污染等问题<sup>[3-6]</sup>。近年来, 随着减肥减药等科技行动及相关政策的实施, 宁夏引黄灌区春小麦施肥水平尤其是施氮量有减少的趋势。但灌水方式及习惯仍沿用传统的大水漫灌, 出现了减氮不节水的现象。

因此, 在春小麦生产过程中如何实现减氮与节水相结合, 以提高产量、水氮利用效率及改善生态环境是目前宁夏引黄灌区春小麦生产上亟需解决的问题。

王西娜等<sup>[2,7]</sup>研究表明, 与传统农户施肥方式相比, 适量减施氮肥处理的小麦的产量及其构成因素均相应增加, 随施氮量的增加呈现先增后减的趋势<sup>[8-10]</sup>。适量减氮可以延缓叶片衰老, 维持较高光合速率, 促进籽粒灌浆, 以提高麦粒饱满度<sup>[11]</sup>。过量施氮则抑制了光合作用, 反而降低了小麦的生产能力和氮肥利用效率<sup>[12-13]</sup>。灌溉亦是影响小麦产量的重要因素。赵财等<sup>[14]</sup>研究表明, 水分对干物质积累的影响大于肥料的影响, 适量灌溉有利于增加干物质积累, 提升小麦灌浆速率<sup>[15]</sup>, 从而提高小麦产量。张珂珂等<sup>[16]</sup>指出, 适当灌溉显著提高春小麦光合性能, 促进了小麦吸收氮素的能力, 相反大水灌溉降低了其光合性能和产量。综上, 适当减少施氮量和灌溉量, 既能促进小麦生长、提高产量及水氮利用效率<sup>[17-18]</sup>, 又能有效降低土壤硝态氮残留量, 改善生态环境<sup>[19]</sup>。目前, 关于合理施肥比例和减施氮肥对宁夏引黄灌区春小麦生长和产量的影响已有研究报道, 但基于减氮条件下灌溉定额对春小麦群体动态、光合及产量影响机理的研究较少。本研究采用微喷带水肥一体化技术, 研究在减氮条件下灌溉定额对春小麦群体动态、光合特性及产量的影

收稿日期: 2022-01-23 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200405); 国家自然科学基金项目(31860590); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03); 宁夏自然科学基金项目(2022AAC02013, 2020AAC03090)

作者简介: 马永鑫, 研究方向为农业水资源高效利用。

Email: 2419665187@qq.com

\*通信作者: 谭军利, 博士, 教授, 研究方向为农业水资源高效利用。

Email: tanjl@nxu.edu.cn

响, 揭示春小麦生长和产量对减氮节水的响应机理, 旨在为宁夏引黄灌区绿色节水丰产的生产模式提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于宁夏中部黄河冲积平原永宁县望洪镇宁夏大学实验农场 (106°24'E, 38°24'N), 该地区年均气温 8.5 °C, 年降水量 180~200 mm, 无霜期 140~160 d, 降雨量相对较少, 属于温带干旱气候, 供试土壤类型主要为灌淤土、盐渍土、淡灰钙土。0~100 cm 土壤基本理化性状见表 1。2021 年春小麦于 3 月 5 日播种, 7 月 15 日收获, 全生育期降雨 67.5 mm, 为干旱年。

表 1 试验地 0~100 cm 土层基础理化性状  
Table 1 Basic physical and chemical properties of the experimental soil in 0-100 cm

土壤深度 Soil depth/ cm	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	矿质态氮 Mineral N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值 pH value
0~20	16.30	0.59	32.01	0.57	24.69	143.01	7.83
>20~40	14.82	0.41	27.57	0.43	22.70	135.25	7.50
>40~60	13.08	0.42	23.56	0.38	15.84	126.90	7.32
>60~80	13.62	0.34	21.79	0.30	16.31	122.72	7.31
>80~100	11.60	0.22	17.22	0.26	7.89	128.69	7.31

### 1.2 田间试验

本试验采用二因素裂区设计, 灌溉定额为主区, 施氮量为副区, 灌溉处理设置常规灌溉 (400 mm, WC)、节水 20% (320 mm, W1) 和节水 40% (240 mm, W2)。施氮处理设置常规施氮 (270 kg/hm<sup>2</sup>, NC)、减量施氮 25% (202.5 kg/hm<sup>2</sup>, NJ) 和不施氮 (0 kg/hm<sup>2</sup>, N0), 试验设计见表 2。小区长 24 m, 宽 3 m, 面积 72 m<sup>2</sup>, 9 个处理, 各 3 次重复, 共设 27 个小区。为避免水肥侧向运移, 在主区之间埋深至 1 m 的塑料棚膜, 并起 0.4 m 宽、0.3 m 高的畦埂; 副区之间起 0.4 m 宽、0.2 m 高的畦埂。

表 2 试验施氮量和灌溉制度设计  
Table 2 Experimental nitrogen application and irrigation schedule design

处理 Treatments		施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌水定额 Irrigating quota/ (mm·次 <sup>-1</sup> )	灌溉定额 Irrigation norm /mm
施氮 Nitrogen	灌溉 Irrigation			
NC	WC	270	80	400
	W1	270	64	320
	W2	270	48	240
NJ	WC	202.5	80	400
	W1	202.5	64	320
	W2	202.5	48	240
N0	WC	0	80	400
	W1	0	64	320
	W2	0	48	240

供试春小麦品种为宁春 4 号, 15 cm 等行距播种, 播种量为 337.5 kg/hm<sup>2</sup>。水源为地下水, 灌溉方式采用微喷带喷灌, 每个主区设置一个首部, 首部由旋翼式水表、

压差式施肥罐、过滤器和球阀组成。分别于 2021 年 4 月 20 日、5 月 6 日、5 月 21 日、6 月 3 日、6 月 18 日, 全生育期内等量灌水 5 次, 微喷带平行于小麦种植方向布置, 放置于小区中间。喷灌带规格为管径 32 mm、并列斜 7 孔、孔径 0.8 mm、喷射角度 80°。试验地全生育期统一按分配比例施入氮肥 (尿素), 氮肥 40% 播种前基施, 60% 追施, 磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>) 和钾肥 (K<sub>2</sub>O 45 kg/hm<sup>2</sup>) 各处理施用量相同, 磷肥 (重过磷酸钙、磷酸二氢钾) 和钾肥 (磷酸二氢钾) 总量的 60% 在播前基施, 40% 追施, 基施肥采用人工撒施的方式, 追施肥料按分配比例实施微喷带水肥一体化随水一同施入, 其他管理措施与当地生产习惯一致。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 群体动态指标

1) 群体总茎数: 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期, 按 20 cm 单行分别调查各时期群体总茎数变化。

茎蘖成穗率=成熟期群体总茎数/拔节期群体总茎数×100%<sup>[20]</sup>。

2) 株高: 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期测定, 不同处理每个小区中选取 10 株能够代表此小区整体长势的小麦, 用卷尺测量小麦底部 (地面) 到顶端的长度。若小麦已抽穗, 则测量地面到穗顶的长度, 每个处理 3 个重复。

3) 叶面积: 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期测定, 不同处理的每个小区中选取 3 株能够代表此小区整体长势的小麦, 从叶片根部完整的取下所有叶片, 用 YMJ-D 型活体叶面积仪测量叶片面积。

4) 干物质累积: 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期在不同处理的每个小区选取单行 20 cm 的植株样本, 置于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 然后 75 °C 恒温烘干至恒质量, 再冷却至常温称质量, 计算每公顷干物积累量。

#### 1.3.2 小麦叶片 SPAD 值及光合参数

1) SPAD 值: 分别于分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期, 在不同处理的每个小区内选取能够代表此小区小麦整体长势的 10 株样本, 使用便携式 SPAD-502 叶绿素仪测定每株小麦叶片的 SPAD 值。

2) 光合参数: 在小麦灌浆期, 选择晴朗无风日用 Li-6400 型光合测定仪测定小麦旗叶的光合作用, 每小区选取 3 片旗叶测定叶片光合速率  $P_n$  ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )、气孔导度  $G_s$  ( $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) 和蒸腾速率  $T_r$  ( $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。

#### 1.3.3 小麦产量及其构成因素

在小麦成熟期, 从不同处理每个小区割单行 1 m 长的小麦植株, 调查穗数、穗长、穗粒数和千粒质量。收获时将每个小区实打实收, 称取籽粒质量, 取部分籽粒烘干测其含水率, 最后折算成单位面积籽粒产量。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS22.0 软件对数据进行统计分析并用 Origin2018 进行作图。采用 SPSS22.0 软件进行数

据方差分析及多重比较，表中数据为 3 个重复的平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 减氮节水对春小麦群体动态的影响

2.1.1 灌溉、施氮及其互作对春小麦各指标的方差分析

方差分析表明（表 3），施氮（N）对各个时期的春小麦群体总茎数、株高、叶面积、地上部干物质累积量及叶片的 SPAD 值均有极显著（ $P<0.01$ ）影响；除拔节期灌溉（W）对株高有显著影响（ $P<0.05$ ），其余时期，灌溉对各个指标均有极显著影响；灌溉施氮互作（W×N），除对叶面积（分蘖期和灌浆期）有显著影响，地上部干物质累积量（灌浆期）极显著影响，SPAD 值（灌浆期）显著影响，对其他指标无显著（ $P>0.05$ ）影响。灌溉、施氮各单因素对测量各指标的影响较灌溉施氮互作更显著。

2.1.2 群体总茎数

由表 4 可知，整个生育期，同一氮肥水平下不同灌溉处理的群体总茎数均无显著性差异，同一灌溉定额水平下，常规施氮和减氮水平处理的群体总茎数无显著差异，但均显著高于不施氮处理，减氮节水处理亦能维持较高的群体总茎数；均在拔节期达到最大。茎蘖成穗率表现为不同处理间均无显著差异，减氮节水也可以维持

较高的茎蘖成穗率。

表 3 灌溉、施氮及其互作对春小麦各指标的方差分析

Table 3 Analysis of variance among irrigation, nitrogen application and their interactions on the indices of spring wheat

指标 Indices	处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
群体总茎数 Population total stem number	N	**	**	**	**	**
	W	ns	ns	ns	ns	ns
	W×N	ns	ns	ns	ns	ns
株高 Plant height	N	**	**	**	**	**
	W	**	*	**	**	**
	W×N	ns	ns	ns	ns	ns
叶面积 Leaf area	N	**	**	**	**	
	W	**	**	**	**	-
	W×N	*	ns	ns	*	
地上部干物质累 积量 Aboveground dry matter accumulation	N	**	**	**	**	**
	W	**	**	**	**	**
	W×N	ns	ns	ns	**	ns
SPAD 值 SPAD value	N	**	**	**	**	
	W	**	**	**	**	-
	W×N	ns	ns	ns	*	

注：\*和\*\*分别代表影响显著（ $P<0.05$ ）和影响极显著（ $P<0.01$ ），ns 代表未达到显著水平（ $P>0.05$ ）。N 为施氮量；W 为灌溉定额。下同。  
Note: \* and \*\* indicate significant effect ( $P<0.05$ ) and extremely significant effect ( $P<0.01$ ), respectively, and ns indicate that there is no significant effect ( $P>0.05$ ). N is the nitrogen application rate; W is the irrigation quota. The same below.

表 4 不同水氮处理对春小麦群体总茎数和茎蘖成穗率的影响

Table 4 Effects of different water and nitrogen treatments on the population total stem number and the earing percentage of stems and tillers in spring wheat

处理 Treatments		群体总茎数 Population total stem number/( $\times 10^4 \text{hm}^{-2}$ )					茎蘖成穗率 Earing percentage of stems and tillers/%
施氮 Nitrogen	灌溉 Irrigation	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage	
NC	WC	989.38±69.42aA	1345.12±138.85aA	1022.73±101.89aA	867.10±66.70aA	815.96±81.81aA	60.66±6.03aA
	W1	922.68±83.92aA	1311.77±101.89aA	956.03±83.93aA	844.87±83.93aA	800.40±41.65aA	61.02±1.63aA
	W2	867.10±33.35aA	1178.37±83.93aA	889.33±101.89aA	789.28±69.43aA	744.82±50.94aA	63.21±0.39aA
NJ	WC	1000.50±66.70aA	1233.95±120.25aA	967.15±120.25aA	811.52±69.43aA	771.50±77.31aA	62.52±6.99aA
	W1	911.56±150.38aA	1256.18±150.38aA	956.03±138.85aA	844.86±83.93aA	793.73±67.69aA	63.19±10.06aA
	W2	855.98±134.78aA	1145.01±117.12aA	867.10±88.24aA	733.70±57.76aA	713.69±73.37aA	62.33±11.39aA
N0	WC	733.70±88.24aB	967.15±88.24aB	855.98±134.78aB	633.65±88.24aB	578.06±50.94aB	59.77±7.43aA
	W1	689.23±101.89aB	922.68±83.93aB	778.16±138.85aB	611.42±83.93aB	558.05±34.22aB	60.48±9.20aA
	W2	667.00±88.24aB	867.10±66.70aB	700.35±88.24aB	544.72±50.94aB	515.81±32.90aB	59.49±8.21aA

注：不同小写字母表示相同生育期同一施肥水平下不同灌溉定额处理间差异显著（ $P<0.05$ ）；不同大写字母表示相同生育期同一灌溉水平下不同施肥处理间差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different irrigation quota treatments at the same fertilization level at same growing stage ( $P<0.05$ ); Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments at the same irrigation level at same growing stage. The same below.

2.1.3 株高

由图 1 可知，不同水氮条件下春小麦的株高随着生育进程的推进逐渐增加。从水分效应看，分蘖期-拔节期，小麦株高增长最快。分蘖期，常规施氮和减氮水平下 WC 和 W1 处理的株高均显著高于 W2；其二者无显著差异，说明，春小麦生长前期在施氮的条件下增加灌溉定额有利植株株高的生长，节水 20%处理不会显著降低株高前期的生长。拔节期-成熟期，常规施氮水平下不同灌溉处理的株高均无显著差异；减氮水平下 W1 处理的株高显著高于 W2，但同 WC 无显著差异；不施氮水平下除分蘖期和拔节期之外，其余时期均为 WC 和 W1 处理的株高显

著高于 W2，WC 和 W1 处理无显著差异。

整个生育期，只有分蘖期不同水氮处理株高存在显著差异，其他时期无显著差异，减氮水平处理的株高均优于常规施氮水平，且减氮水平下 W1 处理的株高高于 WC。成熟期，所有水氮处理中 NJW1 最高达 93 cm，同 NCWC、NCW1 和 NJWC 处理无显著差异。由此可见，减氮 25%节水 20%处理并没有降低春小麦的株高生长。

2.1.4 叶面积

叶片是小麦进行光合作用的主要器官，叶面积是决定小麦生长的重要因素。由图 2 可知，分蘖期-拔节期，常规

施氮水平下 WC、W1、W2 处理的叶面积分别增长 126.11%、131.64%、152.22%；减氮水平下 WC、W1、W2 处理的叶面积分别增长 117.86%、169.61%、125.99%；不施氮水平下 WC、W1、W2 处理的叶面积分别增长 161.98%、151.91%、

133.13%，说明，此阶段在常规施氮水平下随灌溉定额的减少叶面积增长速率有升高的趋势；减氮水平下节水 20%明显的提高了叶面积的增长速率；不施氮水平下随灌溉定额的减少叶面积增长速率逐渐降低。

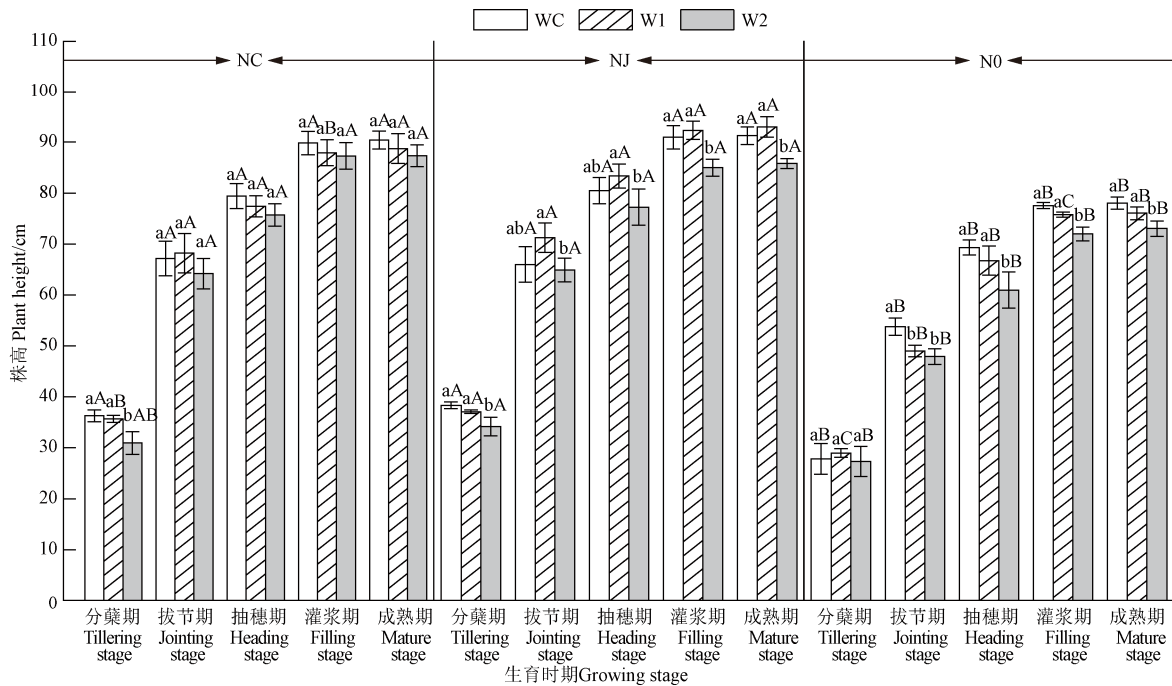
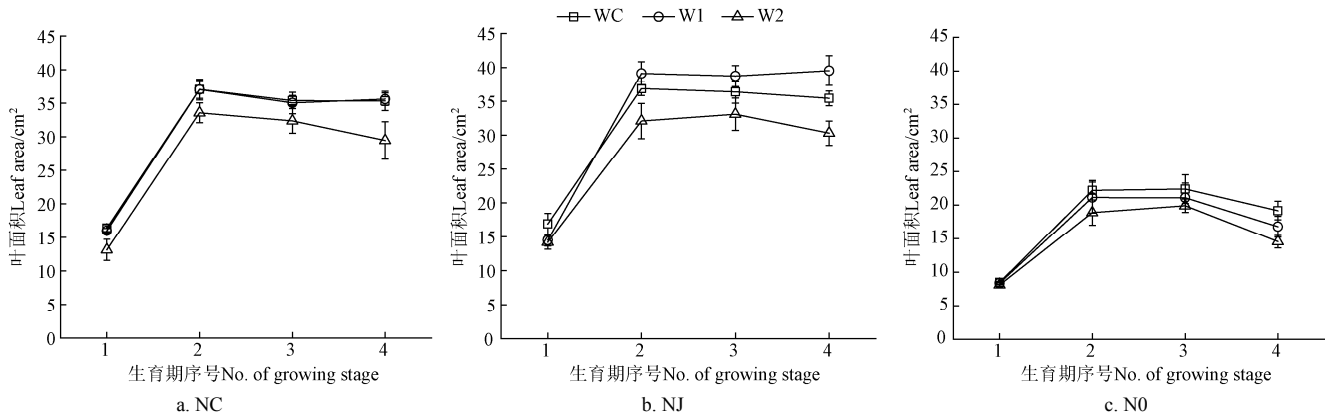


图 1 不同水氮处理对春小麦株高的影响

Fig.1 Effects of different water and nitrogen treatments on plant height of spring wheat



注：生育期 1~4 分别指分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期。

Note: Growing stage 1-4 is tillering stage, jointing stage, heading stage and filling stage, respectively.

图 2 不同水氮处理对春小麦叶面积的影响

Fig.2 Effects of different water and nitrogen treatments on leaf area of spring wheat

方差分析表明，分蘖期和拔节期，常规施氮和减氮水平下 WC 和 W1 处理的叶面积显著高于 W2，WC 和 W1 处理间无显著差异；不施氮水平下不同灌溉处理间无显著差异。抽穗期，常规施氮水平下 WC 处理的叶面积显著高于 W2，略高于 W1；减氮水平下 W1 处理的叶面积显著高于 W2 和 WC；不施氮水平下不同灌溉处理仍无显著性差异。灌浆期，常规施氮和不施氮水平下 WC 和 W1 处理的叶面积均显著高于 W2，其二者无显著差异；减氮水平下不同灌溉处理存在显著差异，表现为 W1>WC>W2。因此，同一施氮水平下节水 20%不会显著

影响春小麦叶面积，减氮水平下灌浆期节水 20%在灌浆中后期仍保持较高的叶面积，不施氮水平下减少灌溉定额抑制了春小麦叶面积的生长。

#### 2.1.5 地上部干物质累积量

由表 5 可知，分蘖期，常规施氮和不施氮水平下 WC 和 W1 处理的干物质质量显著高于 W2，WC 和 W1 无显著差异；减氮水平下 WC 处理的干物质质量显著高于 W2，同 W1 处理无显著差异。拔节期，常规施氮和减氮水平下 W1 处理的干物质质量均显著高于 W2 和 WC；不施氮水平下不同灌溉处理间无显著差异。抽穗期，常规施氮水

平下 WC 处理的干物质量显著高于 W2，同 W1 处理无显著差异；减氮水平下 W1 处理的干物质量显著高于 W2，同 WC 处理无显著差异。灌浆期，常规施氮和减氮水平下 W1 处理的干物质量显著高于 W2，同 WC 处理无显著差异。不施氮水平下不同灌溉处理间均存在显

著差异。成熟期，常规水平和减氮水平下 WC 和 W1 处理的干物质量无显著差异。总体上减氮和常规施氮处理的干物质积累量无显著差异，均高于不施氮。减氮水平下节水 20%处理地上部干物质总的累积效果最好、干物质累积量最高。

表 5 不同水氮处理对春小麦地上部干物质累积量的影响

Table 5 Effects of different water and nitrogen treatments on aboveground dry matter accumulation of spring wheat						
施氮 Nitrogen	灌溉 Irrigation	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
NC	WC	3 188.26±177.95aA	9 007.84±692.45bA	16 168.08±1 014.87aA	19 327.44±1 135.67aA	19 055.80±922.37aA
	W1	2 643.55±134.24aB	10 776.50±998.45aA	14 553.94±1 151.12abB	19 600.91±1 282.19aA	20 121.13±1 828.56aA
	W2	2 526.82±213.87bA	8 897.78±550.56bA	13 317.77±935.93bA	15 738.98±1 207.18bA	16 637.79±342.20bA
NJ	WC	3 425.05±311.35aA	9 088.99±864.95bA	15 387.69±1 200.21abA	18 572.62±1 615.93abA	18 764.57±1 421.23aA
	W1	3 217.16±206.70abA	11 998.22±553.59aA	17 180.81±1 096.58aA	20 283.47±990.92aA	19 806.57±1 574.86aA
	W2	2 652.44±355.17bA	8 856.65±702.21bA	14 300.48±1 069.53bA	16 330.38±1 143.47bA	16 705.31±1 498.64aA
N0	WC	1 917.63±78.00aB	6 546.61±463.16aB	10 459.67±926.22aB	12 950.92±568.49aB	13 098.51±1 003.88aB
	W1	1 743.09±92.50aC	6 247.57±793.80aB	9 486.97±1 168.21aC	11 003.28±776.72bB	11 959.20±491.27abB
	W2	1 537.44±124.74bB	5 834.03±460.35aB	8 613.20±1 310.97aB	9 008.95±882.90cB	10 491.97±749.50bB

2.2 减氮节水对春小麦叶片 SPAD 及光合特性的影响

2.2.1 叶片 SPAD 值

叶片 SPAD 值是反映小麦旗叶光合能力的重要指标<sup>[21]</sup>。由图 3 可知，水分一定的条件下，常规施氮和减氮水平下春小麦叶片 SPAD 值无明显差异，均明显高于不施氮处理。表明适量减氮不会影响叶片的 SPAD 值，氮肥能够提高叶片的 SPAD 值，延长旗叶功能期，提高其光合效率。氮肥一定条件下，不同灌溉处理间 SPAD 值存在差异。拔节期，常规施氮和减氮水平下 WC 和 W1 处理的叶片 SPAD 值显著高于 W2，二者无

显著差异。其减氮水平下 W1 处理叶片的 SPAD 值达到最大为 56.95，较 W2 处理增加 7.07%。抽穗期-灌浆期，常规施氮和减氮水平下 WC 和 W1 处理的叶片 SPAD 值均与 W2 存在显著差异，表现为 W1 处理最大，W2 处理最小；不施氮水平下叶片的 SPAD 值随灌溉定额减少呈降低趋势。同一灌溉定额水平下，常规施氮和减氮水平处理的叶片 SPAD 值除抽穗期 W2 处理，其余均无显著差异。说明，减氮处理的叶片 SPAD 值同常规施氮处理间差异不明显，且减氮水平下节水 20%处理的叶片 SPAD 同常规灌溉亦无显著差异。

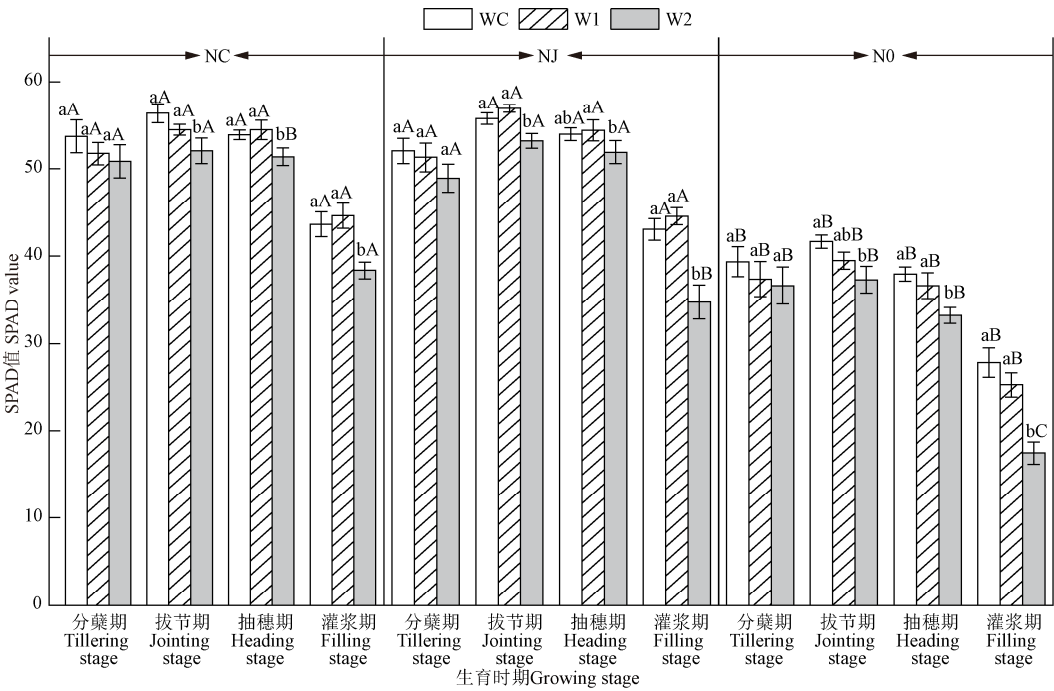


图 3 不同水氮处理对春小麦旗叶 SPAD 值的影响

Fig.3 Effects of different water and nitrogen treatments on SPAD value of spring wheat

2.2.2 旗叶光合特性

由图 4 可知，方差分析表明，施氮和灌溉均对春小麦旗叶的光合参数有极显著 ( $P<0.01$ ) 的影响，灌溉施氮

互作对春小麦旗叶的光合参数无显著 ( $P>0.05$ ) 的影响。春小麦旗叶净光合速率 ( $P_n$ ) 是植物光合作用的特征值，是决定其产量的关键因素<sup>[22]</sup>。具体表现为：常规施氮和



减氮水平下 W1 处理的旗叶  $P_n$  显著高于 W2, 同 WC 处理无显著差异, 较 WC 和 W2 处理分别增加 9.50%、25.74% 和 8.79%、43.82%。说明, 减氮处理不会明显降低小麦的净光合速率, 且减氮水平下节水 20% 能够显著提高小麦的净光合速率。常规施氮和不施氮水平下不同灌溉处理的旗叶胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 无显著差异; 减氮水平下不同灌溉处理间均存在显著差异, 表现为  $W2>WC>W1$ , WC 和 W1 水平下, 常规施氮和减氮处理的净光合速率显著高于不施氮, 但二者无显著差异。所有水氮处理的  $C_i$  处于  $252.64\sim304.82\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。不同水氮处理下, 旗叶气孔导度 ( $G_s$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 随水氮的变化趋势与  $P_n$  一致, 但  $C_i$  与  $G_s$ 、 $T_r$ 、 $P_n$  呈相反的变化趋势。

2.3 减氮节水对春小麦产量及构成因素的影响

由表 6 可知, 同一氮肥下不同灌溉处理的穗长和收获穗数均无显著差异。常规施氮水平下 WC 处理的穗粒数显

著高于 W2, 同 W1 处理无显著差异; 减氮水平下 W1 处理的穗粒数显著高于 W2, 同 WC 处理无显著差异, 较二者分别增加 6.50 粒和 3.37 粒。常规施氮水平下 W1 处理的千粒质量显著高于 W2, 同 WC 处理无显著差异; 减氮水平下 W1 处理的千粒质量显著高于 WC 和 W2, 分别增加 8.32% 和 12.29%; 不施氮水平下不同灌溉处理的千粒质量无显著差异。所有水氮处理中减氮水平下 W1 的穗粒数和千粒质量最高, 分别为 42.87 粒和 54.28 g。因此, 减氮水平下节水 20% 明显增加了春小麦的穗粒数和千粒质量。常规施氮和减氮水平下 W1 处理的产量显著高于 W2, 分别较 W2 处理增加 12.42% 和 19.26%, 同 WC 处理的产量无显著差异; 不施氮水平下 WC 显著高于 W2 处理。减氮水平下 W1 处理的小麦产量达  $8\ 092.52\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 较常规施氮常规灌溉处理的产量无显著差异。由此可知, 减氮节水 20% 处理并未降低春小麦产量。

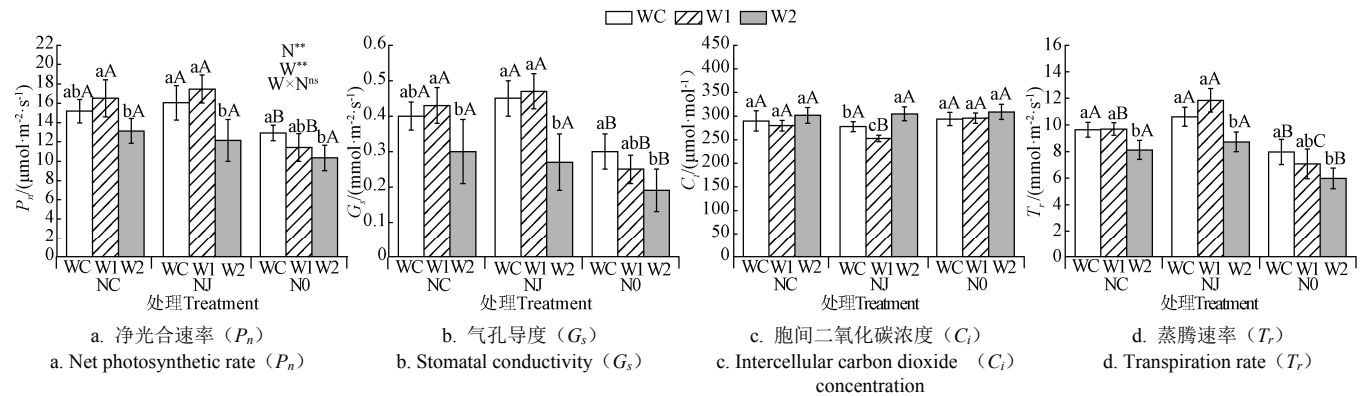


图 4 不同水氮处理对春小麦旗叶光合特性的影响  
Fig.4 Effects of different water and nitrogen treatments on photosynthetic characteristics of spring wheat flag leave

表 6 不同水氮处理对春小麦产量构成因素及产量的影响

处理 Treatments		产量构成因素 Yield and its components				产量
施氮 Nitrogen	灌溉 Irrigation	穗长 Ear length/cm	穗粒数 Number of grains	千粒质量 1 000-grain mass/g	收获穗数 Number of ears harvested/( $\times 10^4\text{hm}^{-2}$ )	Yield/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
NC	WC	10.28±0.23aA	39.27±2.10aA	51.16±1.49abA	815.96±81.81aA	7 562.60±389.03abA
	W1	9.65±0.55aA	38.07±1.11abB	53.67±1.68aAB	800.40±41.65aA	7 785.29±375.10aA
	W2	9.55±0.68aA	35.53±1.70bA	49.75±2.36bA	744.82±50.94aA	6 925.19±332.53bA
NJ	WC	9.63±0.38aA	39.50±2.36abA	50.11±2.62bA	771.50±77.31aA	7 714.24±434.85aA
	W1	10.08±0.17aA	42.87±2.25aA	54.28±1.52aA	793.73±67.69aA	8 092.52±319.36aA
	W2	9.51±0.33aA	36.37±1.56bA	48.34±1.70bA	713.69±73.37aA	6 785.78±192.80bA
N0	WC	8.03±0.63aB	31.37±1.79aB	51.03±1.68aA	578.06±50.94aB	6 229.01±255.03aB
	W1	8.38±0.50aB	32.97±1.51aC	50.60±1.96aB	558.05±34.22aB	5 949.04±483.10abB
	W2	7.12±0.85aB	25.53±2.46bB	49.98±1.85aA	515.81±32.90aB	5 106.80±515.41bB
N		**	**	ns	**	**
W		*	**	**	ns	**
W×N		ns	ns	ns	ns	ns

3 讨 论

3.1 减氮节水对春小麦群体动态的影响

群体数量作为小麦高产稳产的基础<sup>[23]</sup>, 在一定群体总茎数和成穗率下, 可保证产量的提高。有研究表明<sup>[24-25]</sup>, 适宜的水氮可保证春小麦获得合理的群体数量, 提高茎蘖成穗率。本研究中同一氮肥水平下不同灌溉处理的小麦群体

总茎数无显著差异, 但达到节水的目的; 施氮会显著影响小麦的群体总茎数; 节水对茎蘖成穗率无显著影响。本研究春小麦生长前期在施氮条件下增加灌溉定额有利小麦生长; 而不施氮肥下灌溉定额对株高的影响不明显; 这可能是因为高氮可为植株及时补给所需生长的养分, 灌溉定额的减少不会明显的影响株高的生长; 减氮水平下适量减少灌溉定额反而会促进株高的增长; 不施氮水平下植株生长

主要靠吸收水分, 灌溉定额大幅度减少明显抑制了株高。而施氮水平下大幅度减少灌溉定额也会使小麦的生长受到抑制, 抑制小麦株高和叶面积, 这与前人研究结果相似<sup>[8,26]</sup>, 本研究适量减氮并没有明显影响小麦的生长, 且在减氮 25% 下节水 20% 仍能够保持小麦株高和叶面积的生长, 增加小麦根系对水氮的吸收能力。李国强等<sup>[27]</sup>研究发现, 水分亏缺时增施氮肥有利于小麦干物质积累; 适量氮素和水分能促进干物质积累量的提高, 但过高的水分和氮素反而对其有抑制作用, 这与马耕等<sup>[28]</sup>得出的结论一致, 高水高氮抑制生长, 使小麦的干物质积累减小。亦有研究表明<sup>[29-30]</sup>, 在一定灌水条件下, 施氮量过多不利干物质累积和转移。而本研究中一定施氮条件下, 节水 40% 显著降低干物质累积, 节水 20% 对其影响不大; 减氮 25% 下节水 20% 干物质积累量显著增加, 使其达到最高。

### 3.2 减氮节水对春小麦 SPAD 及光合特性的影响

光合作用直接决定着小麦的生产力, 水氮通过影响叶片色素、叶面积大小等多种因素对小麦光合作用造成影响, 进而影响产量。陈旭等<sup>[31-32]</sup>研究均表明水分亏缺使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特性显著提高, 产量增加。这可能因为低灌溉下小麦叶片水分不足, 导致气孔关闭, 影响  $\text{CO}_2$  从空气到细胞内部的扩散,  $P_n$ 、 $T_r$  从而降低。在本研究中, 减氮节水 20% 处理的  $P_n$  和  $G_s$  同常规施氮灌溉处理无显著差异, 并高于常规施氮灌溉; 节水 20% 水平下, 减氮处理  $T_r$  显著高于常规施氮, 其他处理间无显著差异。马静丽等<sup>[11]</sup>研究发现, 光合作用受施氮量的影响, 当施氮量超出一定阈值时导致光合速率降低。高翠民等<sup>[33]</sup>研究发现, 灌水显著提高了小麦 SPAD 值、净光合速率和蒸腾速率。灌浆期旗叶的 SPAD 值、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  提高对小麦籽粒的形成有一定的促进作用。这与唐晓培等<sup>[34]</sup>在研究产量与光合特性关系时结果一致。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。

### 3.3 减氮节水对春小麦产量及构成因素的影响

农户为获得高产, 农业生产中采用“大水大肥”的生产模式, 由此产生水氮投入不合理的问题。研究表明<sup>[18-19]</sup>, 适当减少灌溉和施肥量, 不但提高水肥利用效率, 还显著提高了作物产量。本研究中, 同一施氮条件下节水 20% 同常规灌溉处理下的产量及其构成要素无显著差异, 显著高于节水 40% 处理。减氮节水处理同常规施氮灌溉相比, 并不会降低小麦的产量, 这与前人的研究结果一致<sup>[11,35]</sup>。减氮 25% 下节水 20% 处理不会降低小麦叶片的光合作用、减少小麦干物质累积, 千粒质量和穗粒数, 并维持了较高的产量。

## 4 结 论

与常规施氮相比, 减氮 25% 对春小麦的生长发育和产量无明显影响, 在此前提下, 节水 20% 维持了较高的春小麦群体总茎数和茎蘖成穗率, 并且不会降低春小麦株高、叶面积; 降低叶片 SPAD 值及光合特性; 减少地上部干物质累积量。此外, 所有水氮处理中, 减氮水平下节水 20% 处理的小麦产量最高, 达  $8\ 092.52\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

因此, 在试验期间降雨量仅为 67.5 mm 的干旱年, 减氮 25% 节水 20% 的水氮管理模式, 既能获得较高产量又能节约水氮资源, 可以作为宁夏引黄灌区春小麦丰产高效绿色水肥管理模式。

### 【参 考 文 献】

- [1] 赵莹, 郭鑫年, 赵护兵, 等. 宁夏引黄灌区春小麦施肥现状与评价[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(9): 1274-1280.  
Zhao Ying, Guo Xinnian, Zhao Hubing, et al. Evaluation on present situation of fertilization in spring wheat in the Yellow River irrigation region of Ningxia[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(9): 1274-1280. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王西娜, 于金铭, 谭军利, 等. 宁夏引黄灌区春小麦氮磷钾需求及化肥减施潜力[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4891-4903.  
Wang Xina, Yu Jinming, Tan Junli, et al. Requirement of nitrogen, phosphorus and potassium and potential of reducing fertilizer application of spring wheat in Yellow River Irrigation Area of Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(23): 4891-4903. (in Chinese with English abstract)
- [3] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 924-936.  
Luo Wenhe, Shi Zujiao, Wang Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 924-936. (in Chinese with English abstract)
- [4] 谷少委, 高剑民, 邓忠, 等. 畦灌与施肥时机对土壤硝态氮分布和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 134-142.  
Gu Shaowei, Gao Jianmin, Deng Zhong, et al. Effects of border irrigation and fertilization timing on soil nitrate nitrogen distribution and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 134-142. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1173-1183.
- [6] Malhi S S, Nyborg M, Goddard T, et al. Long-term tillage, straw and N rate effects on some chemical properties in two contrasting soil types in Western Canada[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(1): 133-146.
- [7] 王西娜, 吕喆铭, 谭军利, 等. 宁夏引黄灌区春小麦施肥现状及减肥潜力[J]. 农业科学研究, 2021, 42(2): 6-9.  
Wang Xina, Lü Zhemeng, Tan Junli, et al. Fertilizer application status and fertilizer reduction potential of spring wheat on Yellow River irrigation area in Ningxia[J]. Journal

- of Agricultural Sciences, 2021, 42(2): 6-9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 闻磊, 张富仓, 邹海洋, 等. 水分亏缺和施氮对春小麦生长和水氮利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 478-486.  
Wen Lei, Zhang Fucang, Zou Haiyang, et al. Effects of water and nitrogen rate on the growth, water and nitrogen use of spring wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(4): 478-486. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang X, Shi Y, Guo Z J, et al. Water use and soil nitrate Nitrogen changes under supplemental irrigation with nitrogen application rate in wheat field[J]. Field Crops Research, 2015(183): 117-125.
- [10] 赵营, 周涛, 郭鑫年, 等. 优化施肥对春小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 119-124.  
Zhao Ying, Zhou Tao, Guo Xinnian, et al. Effect of optimum fertilization on spring wheat yield, N utilization and apparent N balance[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 119-124. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马静丽, 方保停, 乔亚伟, 等. 减氮对豫北限水灌溉冬小麦冠层结构和光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 346-355.  
Ma Jingli, Fang Baoting, Qiao Yawei, et al. Effect of lower nitrogen application on canopy structure and photosynthesis of winter wheat grown under limited irrigation in Northern Henan Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(3): 346-355. (in Chinese with English abstract)
- [12] Abedi T, Alemzadeh A, Kazemeini S A. Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(3): 330-336.
- [13] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33-39.  
Ye Youliang, Li Long. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵财, 王巧梅, 郭瑶, 等. 水氮耦合对地膜玉米免耕轮作小麦干物质积累及产量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(11): 1694-1703.  
Zhao Cai, Wang Qiaomei, Guo Yao, et al. Effects of water-Nitrogen coupling patterns on dry matter accumulation and yield of wheat under No-tillage with Previous Plastic Mulched Maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(11): 1694-1703. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.  
Song Mingdan, Li Zhengpeng, Feng Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 119-126. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 with English abstract)
- [17] 吴强, 张永平, 董玉新, 等. 施氮量和灌水模式对小麦产量、品质和氮肥利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 334-342.  
Wu Qiang, Zhang Yongping, Dong Yuxin, et al. Effect of nitrogen application and irrigation modes on yield, nitrogen use efficiency and quality in wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(3): 334-342. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李梦月, 胡田田, 崔晓路, 等. 不同释放期控释肥和水氮用量对冬小麦产量的综合影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 153-161.  
Li Mengyue, Hu Tiantian, Cui Xiaolu, et al. Comprehensive effects of irrigation water and nitrogen levels for controlled release fertilizer with different release periods on winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 153-161. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李莎莎, 马耕, 刘卫星, 等. 大田长期水氮处理对土壤氮素及麦籽粒淀粉糊化特性的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 1067-1076.  
Li Shasha, Ma Geng, Liu Weixing, et al. Effects of long-term irrigation and nitrogen regimes on soil nitrogen content and paste property of wheat grain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(7): 1067-1076. (in Chinese with English abstract)
- [20] 马鑫, 代兴龙, 王晓婧, 等. 冬小麦高产高效群体的年际间稳产性能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3926-3934.  
Ma Xin, Dai Xinglong, Wang Xiaojing, et al. Stability of a winter wheat population with high yield and high resource use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3926-3934. (in Chinese with English abstract)
- [21] 候丽丽, 王伟, 崔新菊, 等. 化肥减量配施有机肥对小麦生长、光合和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 475-482.  
Hou Lili, Wang Wei, Cui Xinju, et al. Effect of reducing chemical fertilizer reduction comined with organic fertilizer application on growth, photosynthesis and yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(4): 475-482. (in Chinese with English abstract)



- [22] 冯兆忠, 王效科, 段晓男, 等. 不同氮水平对春小麦光合速率日变化的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(4): 90-92. Feng Zhaozhong, Wang Xiaoke, Duan Xiaonan, et al. Effect of nitrogen fertilization on diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate in spring wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(4): 90-92. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦田氮挥发损失和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 28(6): 1919-1925. Wang Lei, Dong Shuting, Liu Peng, et al. The interactive effects of water and nitrogen addition on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 28(6): 1919-1925. (in Chinese with English abstract)
- [24] 彭婷, 蒋桂英, 段瑞萍, 等. 滴灌春小麦群体质量与产量的关系[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(5): 655-659. Peng Ting, Jiang Guiying, Duan Ruiping, et al. Relationships between population quality and yield of drip-irrigated spring wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(5): 655-659. (in Chinese with English abstract)
- [25] 欧阳雪莹, 蒋桂英, 冉辉, 等. 氮运筹对新疆滴灌春小麦群体质量和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(5): 585-593. Ouyang Xueying, Jiang Guiying, Ran Hui, et al. Effect of water and nitrogen application on population quality and yield of spring wheat under drip irrigation in Xinjiang[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(5): 585-593. (in Chinese with English abstract)
- [26] 祁有玲, 张富仓, 李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长和氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2399-2404. Qi Youling, Zhang Fucang, Li Kaifeng. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen up-take[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2399-2404. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李国强, 汤亮, 张文宇, 等. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2258-2265. Li Guoqiang, Tang Liang, Zhang Wenyu, et al. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(12): 2258-2265. (in Chinese with English abstract)
- [28] 马耕, 张盼盼, 王晨阳, 等. 高产小麦花后植株氮素累积、转运和产量的水氮调控效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 798-805. Ma Geng, Zhang Panpan, Wang Chenyang, et al. Regulation effect of nitrogen on post-anthesis nitrogen accumulation, transportation and grain yield of high-yield wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 798-805. (in Chinese with English abstract)
- [29] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 194-202. Cai Ruiguo, Zhang Di, Zhang Min, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed conditions[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(2): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [30] Abdel-Ghani A H, Al-Dalain S A, Owais S J. Effect of water deficit and soil nitrogen on dry matter and nitrogen accumulation and mobilization in durum wheat under semi-arid environment[J]. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 2013, 9(40): 457-474.
- [31] 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. Chen Xu, Hao Mingde, Xu Jingjing, et al. Effects of drought stress on photosynthetic 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. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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 with English abstract)
- [33] 高翠民, 杨永辉, 何方, 等. 不同灌溉技术下水氮耦合对小麦光合特性、灌水利用特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 72-80. Gao Cuimin, Yang Yonghui, He Fang, et al. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics irrigation water use characteristics and yield in winter wheat under different irrigation technologies[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(5): 72-80. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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. 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. (in Chinese with English abstract)
- [35] 李秋霞, 王晨阳, 马冬云, 等. 灌水及施氮对高产小麦产量及品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 102-106. Li Quixia, Wang Chenyang, Ma Dongyun, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on grain yield, Protein content and quality traits of winter wheat in high-yielding area[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(1): 102-106. (in Chinese with English abstract)

## Effects of nitrogen reduction and water saving on the photosynthetic characteristics and yield of spring wheat in the Yellow River Irrigation Areas of Ningxia

Ma Yongxin<sup>1</sup>, Wang Xina<sup>2</sup>, Wei Guangyuan<sup>1</sup>, Xue Xu<sup>2</sup>, Hao Wenyue<sup>2</sup>, Wang Zhaohui<sup>3</sup>, Tan Junli<sup>1</sup>✉

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Excessive input of nitrogen fertilizer and low water use efficiency have posed a great threat to the spring wheat production in Yellow River Irrigation District of Ningxia Hui Autonomous Region, Western China. Therefore, this study aims to explore the effects of water-saving irrigation on the population dynamics, photosynthetic characteristics, and the yield of spring wheat under the background of nitrogen reduction. Taking the Ningchun No. 4 as the test material, a systematic field test was carried out at three nitrogen application levels: conventional nitrogen application (270 kg/hm<sup>2</sup>, NC), reduced nitrogen fertilizer 25% (202.5 kg/hm<sup>2</sup>, NJ), and no nitrogen fertilizer (0 kg/hm<sup>2</sup>, N0). Three irrigation scenarios were also set with the water quotas: conventional irrigation (400 mm, WC), water saving 20% (320 mm, W1), and water saving 40% (240 mm, W2). The results showed that: 1) There were no significant differences in the total number of stems in different irrigation treatment groups at the same nitrogen fertilizer level. Nevertheless, an outstanding increase was found in the total number of stems in the population with the conventional nitrogen application and nitrogen reduction level under the same irrigation quotas, compared with the non-nitrogen treatment. The nitrogen reduction and water-saving treatment also maintained a far higher total number of group stems, thereby improving the incidence of tillers. 2) There was no outstanding effect of 25% less nitrogen on the growth and development of spring wheat, compared with the conventional nitrogen application. More importantly, the 20% saving water greatly contributed to the plant height and leaf area of spring wheat for the higher accumulation of dry matter. 3) The 20% reduced nitrogen and saving water were also beneficial for the soil plant analysis development (SPAD) value and photosynthetic characteristics of the leaves, particularly significantly higher than that in the water saving by 40%. There was no significant difference between the nitrogen reduction level and the conventional nitrogen application in the SPAD value and photosynthetic index of spring wheat leaves. 4) The maximum number of grains per ear (42.87 grains) and 1 000-grain mass (54.28 g) were achieved by the saving 20% of water at the nitrogen reduction level among all the water and nitrogen treatments. The highest yield of spring wheat also reached 8 092.52 kg/hm<sup>2</sup>. The yield was not significantly decreased during the water saving of 20%, respectively, compared with the conventional nitrogen application and conventional irrigation treatment. Consequently, the 25% reduced nitrogen and 20% saving water can be expected to obtain a higher yield during spring wheat production with fewer nitrogen resources in the Ningxia Yellow River irrigation area. Therefore, it is suggested to be an effective local nitrogen irrigation scheme for the higher yield of spring wheat production.

**Keywords:** nitrogen; irrigation; fertilizers; spring wheat; nitrogen reduction with water saving; population dynamics; yield; Yellow River Irrigation Area of Ningxia