doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.058

不同施氮水平下调亏灌溉对冬小麦叶片光合与水氮利用效率的影响

吴晓磊[1,2]　刘俊明[1,2]　曹　辉[1,2]　付媛媛[1]　黄　超[1,2]　高　阳[1]

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业农村部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002;
2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要: 为研究冬小麦在不同施氮水平下的调亏灌溉效应,于 2021—2022 年在黄淮海平原的河南省新乡县开展大田试验,设置 3 个施氮水平:N1(120 kg/hm^2)、N2(240 kg/hm^2)和 N3(360 kg/hm^2),在拔节-抽穗期设置 3 个调亏水平:中度调亏(灌水量 18 mm,M)、轻度调亏(灌水量 24 mm,L)和对照(灌水量 30 mm,CK)。结果表明:冬小麦旗叶净光合速率(P_n)受到调亏和施氮水平的显著影响,复水后各处理 P_n 均表现出不同程度的补偿增长效应,补偿效应随施氮量增加而增强,N3M、N3L 处理表现出超级补偿效应,与复水前相比分别增长 42.5% 和 32.4%。花期地上部干物质量、成熟期地上部营养器官干物质量均随施氮量增加而增大,成熟期地上部营养器官干物质量随灌水量增加而增大。而轻度调亏能够促进花期地上部干物质积累和干物质向籽粒方向转移,促进植株氮素、穗氮素积累,进而提高冬小麦产量、水分利用效率(WUE)和氮肥偏生产力(NPFP);运用 Mintab 15.1 软件建立冬小麦产量、WUE、NPFP 与施氮量、灌水量的二次回归方程,计算得出当施氮量为 214.6 kg/hm^2、灌水量为 166.6 mm 时,冬小麦产量为 10 973.1 kg/hm^2,WUE 为 2.7 kg/m^3,NPFP 为 52 kg/kg,复合合意性最高为 0.7,综合效益符合预期目标。因此,施氮量 214.6 kg/hm^{2}结合拔节-抽穗期进行轻度水分调亏,能使冬小麦保持较高产量和水氮利用效率,可作为该地区适宜的冬小麦调亏灌溉模式。

关键词: 冬小麦; 调亏灌溉; 复水; 净光合速率; 补偿效应; 水氮利用效率

中图分类号: S275.6; S365　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0618-10　　**OSID**:

Effects of Regulated Deficit Irrigation with Different Nitrogen Application Levels on Leaf Photosynthesis and Water and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat

WU Xiaolei[1,2]　LIU Junming[1,2]　CAO Hui[1,2]　FU Yuanyuan[1]　HUANG Chao[1,2]　GAO Yang[1]

(1. *Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang* 453002, *China*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Aiming to study the effects of regulated deficit irrigation with different nitrogen application levels on winter wheat, a field experiment was conducted in Xinxiang County, Henan Province, located in the Huang-Huai-Hai Plain from 2021 to 2022. Three nitrogen application levels: N1 (120 kg/hm^2), N2 (240 kg/hm^2) and N3 (360 kg/hm^2), and three regulated deficit levels during the stage of jointing-heading: moderate deficit (irrigation amount 18 mm, M), light deficit (irrigation amount 24 mm, L) and control (irrigation amount 30 mm, CK) were set. The results showed that the net photosynthetic rate (P_n) of winter wheat flag leaves was significantly affected by regulated deficit and nitrogen application level. After re-watering, P_n of all treatments showed different degrees of compensation growth effect, and the compensation effect was enhanced with the increase of nitrogen application rate, N3M and N3L treatments showed a super compensation effect, which was increased by 42.5% and 32.4%, respectively, compared with that before re-watering. Both the aboveground dry matter accumulation at the

收稿日期: 2024-03-27　修回日期: 2024-05-17

基金项目: 河南省重大科技专项(221100110700)和山东省重点研发项目(2023TZXD011)

作者简介: 吴晓磊(1987—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术与工程研究,E-mail: 912607848@qq.com

通信作者: 高阳(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事作物水分生理与高效用水研究,E-mail: gaoyang@caas.cn

flowering stage and dry matter accumulation of aboveground vegetative organs at the maturity stage were increased with the increase of nitrogen application rates, while the latter was also increased with the increase of irrigation amount. However, light regulated deficit could promote the above-ground dry matter accumulation at the flowering stage, the translocation of dry matter to grain and the accumulation of nitrogen in plant and ear, and then improved winter wheat yield, water use efficiency (WUE) and nitrogen partial factor productivity (NPFP). The quadratic regression equation of winter wheat yield, WUE, NPFP and nitrogen application rate, irrigation amount was established by using Mintab 15.1 software. It was calculated that when the nitrogen application rate and irrigation amount were 214.6 kg/hm^2, 166.6 mm, the yield was 10 973.1 kg/hm^2, WUE was 2.7 kg/m^3, NPFP was 52 kg/kg, the composite desirability was the highest of 0.7, and the comprehensive benefit was in line with the expected target. Therefore, light water deficit during the jointing-heading stage combined with the nitrogen application of 214.6 kg/hm^2 could maintain high yield and high water and nitrogen use efficiency of winter wheat, which could be used as a suitable winter wheat deficit irrigation model in this area.

Key words: winter wheat; regulated deficit irrigation; re-watering; net photosynthetic rate; compensatory effect; water and nitrogen use efficiency

0　引言

黄淮海平原是我国冬小麦主要种植区，占全国小麦种植面积的 55%，占全国小麦总产量的 70%[1]，为保障国家粮食安全做出了重要贡献。该地区年平均降雨量 500 ~ 700 mm，但小麦生长季的降水吻合度仅为 0.26，70% 的小麦生产用水需靠抽采地下水灌溉来满足，导致地下水位不断下降和深层漏斗现象的出现，严重影响了当地冬小麦的可持续生产。

调亏灌溉是利用作物生理调节机制，在生长发育的某些阶段主动施加一定程度的水分亏缺，从而影响其光合产物向不同组织器官的分配，抑制作物非生产有机物合成，进而提高产量或品质[2]。水分亏缺具有一定补偿效应，如果运用得当，会对作物的生长发育及产量、品质等起到积极作用[3]。已有研究表明，当作物遭受水分胁迫时，会通过生理适应机制激活抗旱功能来抵御胁迫危害，采用控制性灌溉技术进行复水补偿，可以在不影响产量情况下减少农田耗水[4-6]。SUN 等[7]研究得出，对冬小麦实行调亏灌溉，可在产量不变或略微降低情况下，减少灌溉用水量 40% 左右，提高水分利用效率约 10%。MU 等[8]发现，在抽穗期施加轻度、中度(55% ~ 75% 田间持水率)干旱，开花后复水恢复到 75% ~ 85% 田间持水率，可使小麦 WUE 提高 5% ~22%。作物抗逆反应还受其它因素的影响，如土壤养分供应状况，并且土壤养分和水分对作物的影响不是单独的，而是相互影响、相互制约[9-10]。因此，制定调亏灌溉需要考虑土壤养分状况的影响效应。

氮素是作物生长发育所需的大量元素之一，在作物的生长发育和获取高产中发挥了至关重要的作用，但目前我国氮肥利用效率仅为 40%，比发达国家低 10 ~20 个百分点，不合理的氮肥使用导致土壤硝态氮积累或深层淋失，带来了土壤退化、地下水污染等严重的生态问题。适量施氮可促进作物根系和植株生长，增强作物吸收水分和养分的能力[11]；过量施氮则会加快小麦旗叶叶片后期的衰老和光合能力的衰退，进而降低产量和品质[12]；在不同的土壤水分状况下，氮素对作物的调控效应不同。作物对氮肥的反应一般随灌溉量的减少而降低[13]，但适量减少灌水量和施氮量不仅不会降低小麦产量，而且可以显著提高小麦对水分和氮肥的利用率[14-15]。QIN 等[16]研究表明，在亏灌条件下，冬小麦季节减少 50% 的氮肥投入不会影响冬小麦产量，夏季作物正常施氮和冬小麦减少施氮可维持作物产量。刘国伟等[17]研究表明，在土壤肥力提高到一定程度后，灌水量对产量的影响不显著，只在肥力较低情况下，增加灌水量能显著提高产量。张素瑜等[18]研究表明，氮肥基追比和水分调亏可显著影响小麦产量和水分利用效率。李春喜等[19]得出，拔节期适当追施氮肥能增强冬小麦在生育后期的抗旱能力，进而保证产量。国内外研究者主要就冬小麦需水关键期调亏灌溉的节水增产机理、适宜调亏指标等进行了系统研究，但很少涉及土壤养分供给能力对调亏灌溉效应的影响。因此，有必要开展不同施氮量对冬小麦调亏灌溉补偿效应的研究，为调亏灌溉理论完善与技术模式改进提供支撑。

基于冬小麦水氮高效利用角度，本文研究不同施氮水平下冬小麦对调亏灌溉的光合响应，以及调亏灌溉和不同施氮水平对冬小麦氮素积累和转运的调控作用，揭示调亏灌溉对不同施氮水平冬小麦补偿效应的影响机制，为黄淮海平原冬小麦节水稳产

高效技术构建提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021—2022年在中国农业科学院七里营试验基地(35°18′N,113°54′E,海拔73.2 m)进行。试验基地多年平均气温14.1℃,无霜期210 d,日照时数2 398.9 h,多年平均降雨量589 mm,多年平均蒸发量2 000 mm。试验点土壤类型为壤土,pH值为8.7,播前0~20 cm土层有机质含量(质量比)为18.47 g/kg,全氮含量0.88 g/kg,碱解氮含量67.2 mg/kg,速效磷含量13.5 mg/kg,速效钾含量217.41 mg/kg,0~100 cm土壤容重为1.51 g/cm^3,田间持水率20.5%(质量含水率),地下水埋深大于5 m。试验期间气象资料如图1所示,生育期降雨量为91 mm。

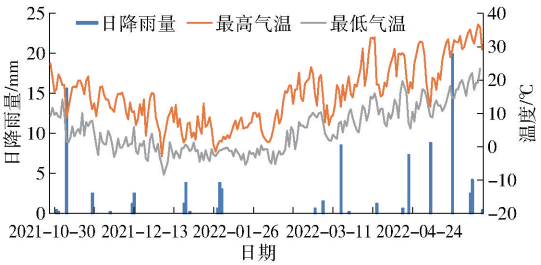

图1 2021—2022年冬小麦生育期日降雨量、最高温度与最低温度

Fig. 1 Daily precipitation, maximum and minimum temperature during wheat season in 2021—2022

1.2 试验设计

供试小麦品种为“百农4199”。2021年10月25日播种,播量为270 kg/hm^2,行距20 cm,2022年6月7日收获。试验采用施氮和水分调亏两因素随机区组设计,3个施氮水平为:N1(120 kg/hm^2)、N2(240 kg/hm^2)、N3(360 kg/hm^2);在冬小麦拔节-抽穗期设置3个调亏处理:中度调亏(灌水量18 mm,M)、轻度调亏(灌水量24 mm,L)和充分灌溉(灌水量30 mm,CK)。试验共9个处理,各处理重复3次,共27个试验小区,小区面积为2.4 m×33 m=79.2 m^2。

灌溉方式为滴灌,滴头流量2.2 L/h,滴头间距30 cm,毛管间距60 cm。当CK处理的土壤相对含水率(土壤含水率占田间持水率百分比)下降至70%~75%时,各处理均进行灌溉;非调亏时期各处理灌水量均为30 mm。灌水量用水表计数控制,生育期灌水情况见表1。播前基施磷肥(P_2O_5,120 kg/hm^2)、钾肥(K_2O,120 kg/hm^2);氮肥基追比5∶5,在拔节期和抽穗期采用压差施肥罐进行等量追肥。其他管理措施按照当地高产田要求规范管理。

表1 2021—2022年小麦全生育期灌水量和追肥量

Tab. 1 Irrigation amount and topdressing amount during wheat growing stages in 2021—2022

参数	日期	处理								
		N1M	N2M	N3M	N1L	N2L	N3L	N1CK	N2CK	N3CK
灌水量/mm	3月10日	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	3月23日	18	18	18	24	24	24	30	30	30
	4月8日	18	18	18	24	24	24	30	30	30
	4月20日	18	18	18	24	24	24	30	30	30
	4月30日	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	5月15日	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	总量	144	144	144	162	162	162	180	180	180
追肥施氮量/(kg·hm^{-2})	3月23日	30	60	90	30	60	90	30	60	90
	4月8日	30	60	90	30	60	90	30	60	90
	总量	60	120	180	60	120	180	60	120	180

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率和硝态氮含量

在小麦播种前及返青、拔节、抽穗、灌浆和成熟期,分别用土钻采集土样,取样深度为0~100 cm,每20 cm为一单元。一部分土样采用干燥法测定土壤含水率,另一部分鲜土用0.01 mol/L的$CaCl_2$溶液浸提,振荡30 min后过滤,制成浸提液,用AA3型流动分析仪(SEAL,德国)测定浸提液中硝态氮含量。

1.3.2 冬小麦生物量和植株全氮含量

从返青期开始,每隔10 d从每个处理选取10株长势均匀且具有代表性的小麦植株,测定株高和叶面积后,将小麦植株分解成不同器官,于105℃下杀青30 min,然后于75℃下干燥至恒定质量,分别称取各部分质量,最后结合群体密度计算单位面积的生物量;将干燥称量后的植株样品磨碎过0.5 mm筛,采用$H_2SO_4-H_2O_2$消煮,用AA3型流动分析仪(SEAL,德国)测定植株样品全氮含量。

干物质转移量(kg/hm^2)为花期地上部干物质累积量与成熟期地上部营养器官干物质累积量(茎叶+颖壳)差值。干物质转移率(%)为干物质转移

量占花期地上部干物质累积量百分比。

1.3.3　叶片净光合速率

调亏灌水前后，选择晴好天气，在 09:30—11:30，每处理选长势一致的 3 株进行测定，挑旗前测最上一片全展叶，挑旗后测旗叶，用 Li-6400XT 型便携式光合仪（LI-COR 公司，美国）测定叶片净光合速率。测定条件为红蓝光源叶室，设定光合有效辐射（PAR）为 1 200 μmol/(m²·s)，CO_2 样品浓度设定为 400 μmol/mol。

1.3.4　测产

小麦成熟后，每个小区随机选取 1 m²（1 m × 1 m）为测产样本，籽粒自然风干后称量计产。每处理重复 3 次，换算成单位面积产量。

1.3.5　水分利用效率

采用水分平衡法计算小麦生育期总耗水量[20]，计算式为

$$ETa = P + I + U - R - D - \Delta W \quad (1)$$

式中　ETa——小麦生育期总耗水量，mm

P——有效降雨量，mm

I——灌水量，mm

U——地下水补给量，mm

R——径流量，mm

D——深层渗漏量，mm

ΔW——试验末期土壤贮水量与初期土壤贮水量差值，mm

由于滴灌灌水定额较小，故 R 和 D 可以忽略不计，地下水埋深在 5 m 以下，故 U 也可忽略不计，因此式（1）可简化为

$$ETa = P + I - \Delta W \quad (2)$$

水分利用效率（WUE）计算公式为

$$WUE = 0.1Y/ETa \quad (3)$$

式中　Y——籽粒产量，kg/hm²

1.3.6　氮肥偏生产力

氮肥偏生产力（NPFP）计算式为

$$NPFP = Y_N/N \quad (4)$$

式中　Y_N——施氮处理小麦总产量，kg/hm²

N——肥料氮总投入量，kg/hm²

1.4　统计分析

采用 DPS 软件对数据进行统计分析，在 5% 概率水平上采用双因素方差分析，采用 LSD 法进行多重比较（$p < 0.05$），采用 Excel 2010、Origin 2022 和 Mintab 15.1 软件进行数据拟合与绘图。

2　结果与分析

2.1　水分调亏与施氮对冬小麦净光合速率的影响

图 2 为抽穗期和开花期复水前后冬小麦旗叶净光合速率 P_n（图中不同小写字母表示处理间差异显著（$p < 0.05$）；ns 表示无显著性差异（$p > 0.05$），** 表示差异极显著（$p < 0.01$），下同）；施氮对抽穗期、开花期复水前后 P_n 影响显著（$p < 0.01$），调亏、施氮和调亏交互作用对抽穗期复水前后、开花期复水前 P_n 影响极显著（$p < 0.01$），但均对开花期复水后 P_n 影响不显著（$p > 0.05$）。如图 2a 所示，在抽穗期，复水前 CK 处理 P_n 最大，为 24.92 μmol/(m²·s)，较 L、M 处理分别高 7.00% 和 8.66%；CK 处理 P_n 随着施氮量的增加而显著增大（$p < 0.05$），随着调亏水平的增加，施氮量的增加会逐渐抑制 P_n，P_n 在 N3L 处理时最大。如图 2b 所示，在开花期，复水前 P_n 与抽穗期表现基本一致。

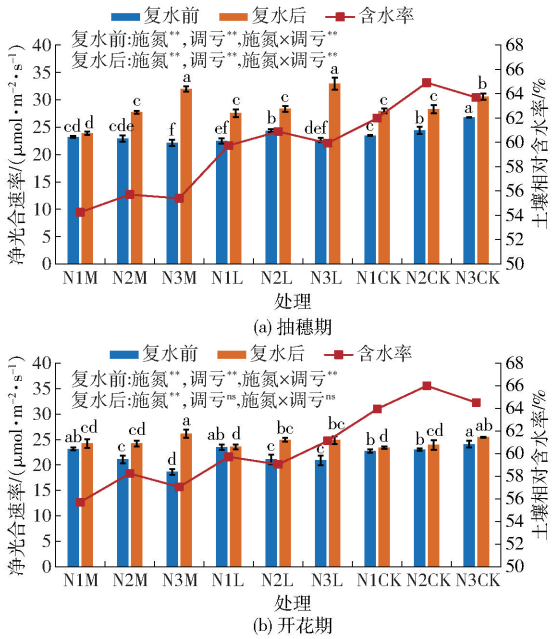

图 2　抽穗期和开花期复水前后冬小麦旗叶净光合速率和复水前土壤相对含水率

Fig. 2　Net photosynthetic rate (P_n) of flag leaf in winter wheat before and after re-watering and relative soil water content before rewatering in heading stage and flower stage

复水后各处理 P_n 均表现出一定程度的增长，与复水前相比，抽穗期、开花期 M 处理 P_n 平均增幅分别为 22.91%、19.9%，L 处理平均增幅分别为 28.16%、12.7%，均显著大于 CK 处理的 16.30% 和 4.28%（$p < 0.05$）；P_n 增幅随着施氮量增加而显著增大（$p < 0.05$），其中 N3M、N3L 处理 P_n 分别增长 42.5% 和 32.4%，表现出超级补偿效应。

2.2　水分调亏与施氮对冬小麦干物质积累和转移的影响

各处理冬小麦地上部干物质累积量、转移量及转移率如表 2 所示，花期地上部干物质累积量（以下简称“花期累积量”）显著受到施氮、调亏水平的影响（$p < 0.01$），但施氮和调亏交互作用对花期累

表 2 各处理冬小麦干物质累积量、转移量及干物质转移率

Tab. 2 Dry matter accumulation, transfer and transfer rate of winter wheat under different treatments

处理	花期地上部干物质累积量/(kg·hm^{-2})	成熟期地上部营养器官干物质累积量(茎叶+颖壳)/(kg·hm^{-2})	干物质转移量/(kg·hm^{-2})	干物质转移率/%
N1M	12 395.2^{e}	7 864.6^{e}	4 530.5^{c}	36.5
N1L	13 605.1^{bcd}	8 676.7^{c}	4 928.4^{bc}	36.1
N1CK	12 878.0^{de}	8 337.2^{d}	4 542.8^{c}	35.3
N2M	12 215.9^{e}	7 640.0^{e}	4 576.0^{c}	37.4
N2L	14 405.1^{ab}	8 642.7^{c}	5 762.4^{a}	40.0
N2CK	14 370.8^{abc}	9 448.6^{a}	4 922.2^{bc}	34.2
N3M	13 482.3^{cd}	8 363.4^{d}	5 119.0^{abc}	37.8
N3L	14 569.0^{a}	9 046.7^{b}	5 522.3^{ab}	37.9
N3CK	14 294.9^{abc}	9 034.1^{b}	5 260.9^{abc}	36.8
F 施氮	**	**	*	
F 调亏	**	**	*	
F 施氮×调亏		**		

注:同列数字后不同小写字母表示差异显著($p<0.05$);* 表示差异显著($0.01\leq p<0.05$),** 表示差异极显著($p<0.01$)。下同。

积量影响不显著($p>0.05$)。花期累积量随着施氮量增加而增大,与 N1 处理相比,N2、N3 处理花期累积量分别增大 5.43% 和 8.91%,N2、N3 处理均显著大于 N1 处理($p<0.05$);花期累积量随着调亏水平增加呈先增大后降低的规律,L 处理花期累积量最大,为 14 193.1 kg/hm^2,M、CK 处理花期累积量较 L 处理分别降低 10.54% 和 2.43%,且 L、CK 处理花期累积量均显著大于 M 处理($p<0.05$),表明轻度调亏能够促进花期地上部干物质累积。成熟期地上部营养器官干物质累积量(以下简称"成熟期累积量")与花期地上部干物质累积量表现基本一致,不同的是施氮和调亏交互作用对成熟期累积量影响显著($p<0.01$),且成熟期累积量在 CK 处理最大,为 8 940.0 kg/hm^2,较 L、M 处理分别增大 1.72% 和 12.37%,且各处理间成熟期累积量差异显著($p<0.05$)。

干物质转移量显著受到施氮、调亏水平的影响($p<0.05$),但施氮和调亏交互作用对干物质转移量影响不显著($p>0.05$)。L 处理干物质转移量最大,为 5 404.3 kg/hm^2,较 M、CK 处理分别增大 13.97% 和 10.10%,且 L 处理显著大于 M 和 CK 处理($p<0.05$),表明轻度调亏能够促进干物质向籽粒方向转移;施氮和调亏对干物质转移率影响不显著($p>0.05$),与 CK 处理相比,M、L 处理干物质转移率分别提高 5.19% 和 7.28%。

2.3 水分调亏与施氮对冬小麦氮素积累和转运的影响

图 3(图中 * 表示差异显著($p<0.05$),下同)为各处理不同生育期冬小麦植株全氮量,植株全氮量表现出先增加后降低的规律,在开花期达到最大;施氮、调亏及施氮和调亏交互作用均对植株全氮量影响显著($p<0.05$)。植株全氮量随着施氮量的增加而显著增大($p<0.05$),与 N1 处理相比,N2、N3 处理植株全氮量平均增大 15.71% 和 23.76%;植株全氮量随着调亏水平的增加表现出先增大后降低的规律,与 CK 处理相比,M 处理植株全氮量平均降低 6.12%,L 处理植株全氮量平均增大 3.93%,其中灌浆期和收获期 L 处理植株全氮量显著大于 CK 处理($p<0.05$),表明轻度调亏后复水能够促进植株全氮积累。

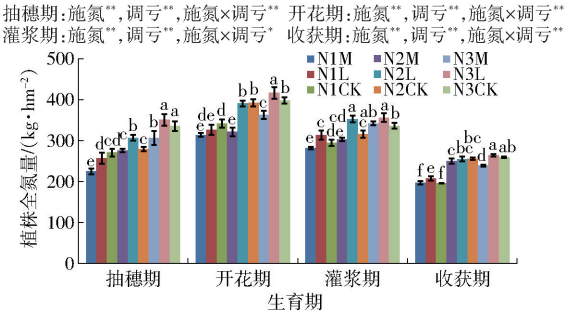

图 3 各处理不同生育期冬小麦植株全氮量

Fig. 3 Total nitrogen content of winter wheat plants at different growth stages under different treatments

图 4 为各处理不同生育期冬小麦穗氮素含量,穗氮素含量表现出不断增大的规律;穗氮素含量显著受到施氮、调亏水平的影响($p<0.05$);穗氮素含量随着施氮量的增加而增大,与 N1 处理相比,N2、N3 处理穗氮素含量平均增加 10.27% 和 17.33%,其中抽穗期 N2、N3 处理穗氮素含量均显著大于 N1 处理($p<0.05$),开花期、灌浆期、收获期各处理间穗氮素含量差异均显著($p<0.05$);抽穗期,穗氮素含量随着调亏水平的增加而显著降低,与 CK 处理相比,M、L 处理穗氮素含量分别降低 10.96% 和 4.05%;开花期,与 CK 处理相比,M 处理穗氮素含

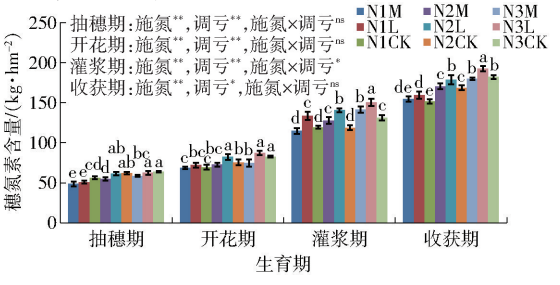

图 4 各处理不同生育期冬小麦穗氮素含量

Fig. 4 Nitrogen content in spike of winter wheat at different growth stages under different treatments

量降低 5.15%，L 处理穗氮素含量增大 6.37%，且各处理间穗氮素含量差异均显著（$p<0.05$）；灌浆期和收获期，与 CK 处理相比，M、L 处理穗氮素含量分别增大 2.21% 和 10.25%，且 L 处理穗氮素含量显著大于 CK 处理（$p<0.05$），表明调亏后复水能够促进氮素在穗中的积累。

2.4　水分调亏与施氮对冬小麦产量构成的影响

表 3 为各处理冬小麦产量构成，冬小麦穗数显著受到调亏、施氮及其交互作用的影响（$p<0.01$），穗数随着水分调亏的增加而减小，与 M 处理相比，L、CK 处理穗数分别增大 3.80% 和 7.27%；随着施氮量增加表现出先增加后减少的规律，在 N2 处理穗数最多，比 N1、N3 处理分别增大 11.97% 和 4.45%。

表 3　各处理冬小麦产量构成

Tab.3　Yield composition of winter wheat under different treatments

处理	穗数/（穗·hm^{-2}）	穗粒数/粒	千粒质量/g
N1M	$6.203\,1\times10^{6f}$	32.91^{f}	45.71^{abc}
N2M	$6.853\,4\times10^{6bc}$	38.83^{cd}	44.99^{cd}
N3M	$6.670\,0\times10^{6cd}$	38.24^{e}	43.53^{de}
N1L	$6.570\,0\times10^{6de}$	38.43^{de}	46.81^{a}
N2L	$6.986\,8\times10^{6b}$	39.37^{b}	45.28^{bc}
N3L	$6.920\,1\times10^{6b}$	40.33^{a}	44.40^{cd}
N1CK	$6.453\,2\times10^{6e}$	38.88^{bcd}	46.51^{ab}
N2CK	$7.687\,2\times10^{6a}$	38.84^{cd}	44.65^{cd}
N3CK	$7.020\,2\times10^{6b}$	39.10^{bc}	42.73^{e}
施氮	**	**	**
F 调亏	**	**	
施氮×调亏	**	**	

穗粒数显著受到调亏、施氮及其交互作用的影响（$p<0.01$），从调亏水平看，穗粒数在 L、CK 处理间差异不显著，但均显著大于 M 处理（$p<0.05$）；从施氮水平看，穗粒数在 N2、N3 处理间差异不显著，但均显著大于 N1 处理（$p<0.05$）；其中在 N1 处理下，穗粒数由大到小依次为 CK 处理、L 处理、M 处理，其中 CK、L 处理间差异不显著（$p>0.05$），但均显著大于 M 处理（$p<0.05$）；在 N2、N3 处理下，L 处理穗粒数最大。

施氮对千粒质量影响显著（$p<0.01$），但调亏、调亏与施氮交互作用对千粒质量影响不显著（$p>0.05$）；千粒质量随着施氮量增大而显著降低（$p<0.05$），这与 LU 等[21]的研究结论一致，与 N1 处理相比，N2、N3 处理分别降低 2.96% 和 6.02%；同一施氮水平下，L 处理千粒质量较大，其中 N1L 处理千粒质量最大，比其他处理增大 0.65% ~9.54%。

2.5　水分调亏与施氮对小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响

表 4 为各处理冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力，调亏、施氮对冬小麦产量、WUE、NPFP 的影响极显著（$p<0.01$），但调亏和施氮交互作用对它们影响不显著（$p>0.05$）；从调亏水平看，产量由大到小依次为 L 处理、CK 处理、M 处理，L、CK 处理产量差异不显著（$p>0.05$），但均显著大于 M 处理（$p<0.05$）；从施氮水平看，产量由大到小依次为 N3 处理、N2 处理、N1 处理（$p<0.05$）；N3L 处理产量最大，比其他处理增大 1.38% ~32.33%。

表 4　各处理冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力

Tab.4　Yield, WUE and NPFP of winter wheat under different treatments

处理	施氮量/（kg·hm^{-2}）	灌水量/mm	产量/（kg·hm^{-2}）	水分利用效率/（kg·m^{-3}）	氮肥偏生产力/（kg·kg^{-1}）
N1M	120	144	$8\,691.9^{f}$	2.22^{e}	72.43^{b}
N2M	240	144	$10\,412.1^{d}$	2.62^{e}	43.38^{d}
N3M	360	144	$10\,671.9^{cd}$	2.58^{e}	29.64^{f}
N1L	120	162	$9\,165.3^{e}$	2.40^{d}	76.38^{a}
N2L	240	162	$11\,275.5^{ab}$	2.81^{a}	46.98^{c}
N3L	360	162	$11\,502.3^{a}$	2.76^{ab}	31.95^{e}
N1CK	120	180	$9\,264.4^{e}$	2.29^{e}	77.20^{a}
N2CK	240	180	$11\,045.5^{bc}$	2.65^{e}	46.02^{c}
N3CK	360	180	$11\,345.7^{ab}$	2.67^{bc}	31.52^{e}
施氮			**	**	**
F 调亏			**	**	**
施氮×调亏					

从调亏水平看，WUE 由大到小依次为 L 处理、CK 处理、M 处理（$p<0.05$），与 M 处理相比，L、CK 处理 WUE 分别增大 7.41% 和 2.60%；从施氮水平看，WUE 由大到小依次为 N2 处理、N3 处理、N1 处理，与 N1 处理相比，N2、N3 处理分别增大 16.88% 和 15.87%，且 N2、N3 处理 WUE 均显著大于 N1 处理（$p<0.05$）；N2L 处理 WUE 最大，比其他处理增大 1.81% ~26.58%。

NPFP 随施氮量增加而显著降低，这与 WANG 等[22]和 LI 等[23]的结论一致，与 N1 处理相比，N2、N3 处理 NPFP 分别降低 39.66% 和 58.80%；从调亏水平看，NPFP 由大到小依次为 L 处理、CK 处理、M 处理，其中 L、CK 处理 NPFP 显著大于 M 处理（$p<0.05$），表明轻度调亏能够显著提高 NPFP。

2.6　水分调亏与施氮对冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的互作效应

运用 Mintab 15.1 数据分析软件对表 4 中的数据进行多元回归拟合分析，结果见表 5，利用 Origin 2022 软件绘制它们之间关系，如图 5 所示。

表 5 施氮量、灌水量和冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的回归方程

Tab. 5 Regression equation of nitrogen application amount, irrigation amount and yield, WUE and NPFP of winter wheat

输出变量	回归方程	R^2	最大值	施氮量/(kg·hm^{-2})	灌水量/mm
产量	$Y_1=11\,183.8+1\,066.4X_1+313.3X_2-804.1X_1^2-409.1X_2^2$	0.994 5 **	11 603.8 kg/hm^2	321.2	169.1
水分利用效率	$Y_2=2.793+0.182X_1+0.033X_2-0.205X_1^2-0.15X_2^2$	0.995 1 **	2.8 kg/m^3	292.1	164.0
氮肥偏生产力	$Y_3=46.619-22.15X_1+1.548X_2+7.727X_1^2-1.738X_2^2-0.723X_1X_2$	0.999 9 **	77.2 kg/kg	120.0	173.8

注:$X_1=(x_1-240)/120$,$X_2=(x_2-162)/18$,x_1、x_2 为真实施氮量、灌水量;Y_1、Y_2 和 Y_3 分别表示产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。** 表示回归方程 $p<0.01$。

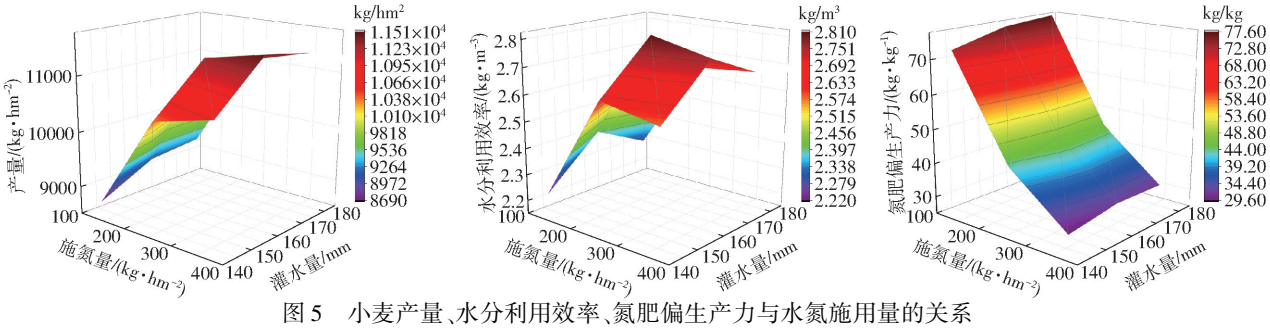

图 5 小麦产量、水分利用效率、氮肥偏生产力与水氮施用量的关系

Fig. 5 Relationships of yield, WUE and NPFP with irrigation and nitrogen fertilizer amounts

由图 5、表 5 可知,产量随着施氮量、灌水量增加呈先增加后降低,在施氮量为 321.2 kg/hm^2、灌水量为 169.1 mm 时,产量最高为 11 603.8 kg/hm^2。WUE 随着施氮量、灌水量增加呈先增加后降低,在施氮量为 292.1 kg/hm^2、灌水量为 164.0 mm 时,WUE 最高,为 2.8 kg/m^3。NPFP 随着施氮量的增加而降低,随着灌水量的增加而增加,在施氮量为 120.0 kg/hm^2、灌水量为 173.8 mm 时,NPFP 最高为 77.2 kg/kg。

为获得较高产量和 WUE,需较高施氮量和灌水量,要获得较高 NPFP,却要求施氮量尽量低;因此采用 Mintab 响应优化器对 3 个响应的目标、期望值、上下限和重要性进行设置,其中上、下限通过表 5 获得,望目值在望大响应中取上限值,取 3 个响应的重要性与权重相同,优化后结果为:当施氮量为 214.6 kg/hm^2、灌水量为 166.6 mm 时,产量为 10 973.1 kg/hm^2,WUE 为 2.7 kg/m^3,NPFP 为 52 kg/kg,复合合意性为 0.7,符合预期目标,这与 WANG 等[24]研究得出的黄淮海平原冬小麦高产最佳施氮量为 180 ~ 240 kg/hm^2 的结论基本一致。为了验证优化结果的可行性,对优化后的参数组合进行试验验证。设定施氮量为 120 kg/hm^2、灌水量为 144 mm,预测冬小麦产量为 8 590.9 kg/hm^2,WUE 为 2.2 kg/m^3,NPFP 为 72.5 kg/kg,与实际值的相对误差分别为 1.16%、0.14% 和 0.79%,试验结果与预测值很接近,验证了该模型的可靠性。

3 讨论

3.1 调亏灌溉条件下不同施氮量对冬小麦净光合速率的影响

光合作用是植物重要的生理活动之一,是产生有机物质的主要途径。水分是光合作用的重要原料,作物水分亏缺与光合速率有着直接关系[3]。王东博等[25]研究得出,在水分胁迫条件下,各亏水处理净光合速率均下降,但下降程度不同,亏水越严重,光合速率下降程度越大,复水后各亏水处理净光合速率有所恢复,但均低于对照组处理;BUCKLEY 等[26]指出,严重水分胁迫会损害叶片组织,降低光合作用;本研究结果表明,水分胁迫会显著抑制旗叶净光合速率,这与上述研究结论一致,复水后调亏处理 P_n 均有不同程度增长,表现出一定的生理补偿效应,且随着施氮量增加而增强,在 N3 处理下 P_n 甚至表现出超级补偿效应,高氮下 P_n 的高补偿效应可能是由于施氮提高了叶片的光合机构活性和羧化效率[27]。复水后调亏处理 P_n 甚至超过了对照处理,这可能是由于本试验将调亏灌溉与滴灌技术结合,通过分阶段追肥更好地满足了小麦生育后期对水肥的需求[28],促进了小麦光合作用。

3.2 调亏灌溉条件下不同施氮量对冬小麦干物质与氮素积累转运的影响

小麦籽粒中的干物质大部分来源于其花后的光合作用产物和花前贮藏于营养器官的光合产物的转运、分配[29],较高的干物质积累和转运量有利于小麦获得较高籽粒产量;土壤水分状况对小麦干物质积累与分配有显著影响,黄彩霞等[30]研究认为,适度水分胁迫可促进茎鞘、叶及颖壳 + 穗轴储藏性光合产物向籽粒转运,提高干物质转移率;王晓雨等[31]得出拔节期轻度干旱有利于地上部干物质和总干物质积累;这些结果与本文得出的轻度调亏能够促进地上部干物质积累,提高干物质转移率基本一致。氮素营养是影

响小麦干物质积累的主要因素[32]，张杰等[33]研究表明，施用氮肥能够显著促进小麦干物质积累，并在一定施氮量范围内，干物质积累量随施氮量增加而增大，但超出这个范围时，增施氮肥会导致干物质积累量不增反降；土壤氮的有效性主要受到土壤水分含量的影响[23]，本文研究发现，花期地上干物质量随着施氮量增加而增大，但 N2、N3 处理差异不显著，但均显著大于 N1 处理；轻度调亏能显著提高植株氮素和穗氮素积累量；这与曹彩云等[34]得出的小麦氮素转运效率及对籽粒氮素的贡献率均随灌溉次数和灌水量增加呈现降低趋势基本一致。

3.3　调亏灌溉条件下不同施氮量对冬小麦水氮利用效率的影响

“以肥调水、以水促肥”的理论基础是水氮之间耦合效应，水分和氮肥协调投入，产生明显的水氮互作效应，才会对小麦产量和水氮利用效率产生显著影响[35-36]。JIANG 等[37]得出适度亏缺灌溉能够显著提高作物水分生产率，但不影响作物产量；LENKA 等[38]指出干旱或低灌溉量下，小麦水分利用效率随着施氮量增加而增高；丛鑫等[39]研究得出，适当的水肥配比才可获得较高的地上干物质累积量、产量与经济效益，过量的水肥投入并不会使产量与经济效益持续增加；本文研究得出，在 N1 水平下，WUE 随着灌水量增加而增大，这与相对充足的水分可以缓解氮肥减量对小麦产量的抑制作用[40]基本一致；在 N2、N3 水平下，在拔节-抽穗期进行 L 调亏，能够提高小麦水分利用效率，这可能是因为在中、高施氮量下，轻度水分调亏能够减轻根区硝态氮的淋溶损失，提高了根区有效氮素含量所致；本文得出 NPFP 随着施氮量增加而降低，这与 DUAN 等[41]和何平如等[42]的结论一致。由于本研究仅是一年的试验结果，不同施氮量下冬小麦调亏灌溉效应还有待进一步探讨。

4　结论

（1）在拔节-抽穗期对冬小麦进行调亏灌溉，复水后各调亏处理 P_n 表现出一定的生理补偿效应，补偿效应随着施氮量增加而增大，在 N3 处理 P_n 甚至表现出超级补偿效应。

（2）植株全氮、穗氮素含量均随施氮量增加而增大，轻度调亏能促进植株全氮、穗氮素积累，有利于花期地上部干物质积累和干物质向籽粒方向转移，进而提高冬小麦产量、WUE 和 NPFP。

（3）当施氮量为 214.6 kg/hm^2、灌水量为 166.6 mm 时，产量为 10 973.1 kg/hm^2，WUE 为 2.7 kg/m^3，PFPN 为 52 kg/kg，复合合意性最高为 0.7，综合效益符合预期目标；因此，施氮量 214.6 kg/hm^2 结合拔节-抽穗期进行轻度水分调亏，能使冬小麦保持较高产量和水氮利用效率，可作为该地区适宜的冬小麦调亏灌溉模式。

参　考　文　献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京：中国统计出版社，2018.

[2] 温越，王振华，李文昊，等. 调亏灌溉与施肥配比对滴灌葡萄生长、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2020，39(11)：38-46.
WEN Yue, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. The effects of regulated deficit drip irrigation coupled with different fertilizations on growth, yield and quality of grape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 38-46. (in Chinese)

[3] 于欣廷，崔宁博，麻泽龙. 调亏灌溉应用研究进展[J]. 四川水利，2020(1)：3-15.

[4] GUO Z J, SHI Y, YU Z W, et al. Supplemental irrigation affected flag leaves senescence post-anthesis and grain yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 100-109.

[5] LV G H, SONG J Q, BAI W B, et al. Effects of different irrigation methods on micro-environments and root distribution in winter wheat fields[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(8): 1658-1672.

[6] WANG D. Water use efficiency and optimal supplemental irrigation in a high yield wheat field[J]. Field Crops Research, 2017, 213: 213-220.

[7] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Performance of a double cropping system under a continuous minimum irrigation strategy[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 281-289.

[8] MU Q, CAI H J, SUN S K, et al. The physiological response of winter wheat under short-term drought conditions and the sensitivity of different indices to soil water changes[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243(1): 106475.

[9] 孟兆江，段爱旺，高阳，等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(12)：203-212.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 203-212. (in Chinese)

[10] LI S X, WANG Z H, MALHI S S, et al. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dry land areas of China[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 223-265.

[11] 赵炳梓,徐富安,周刘宗,等. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率[J]. 土壤,2003,35(2):122 - 125.
ZHAO Bingzi, XU Fuan, ZHOU Liuzong, et al. Wheat yield and water-use efficiency as influenced by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer[J]. Soil,2003,35(2):122 - 125. (in Chinese)
[12] 闫恒辉,温樱,王东. 底肥分层条施对冬小麦旗叶衰老和光合特性、籽粒产量和肥料利用率的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(5):813 - 821.
YAN Henghui, WEN Ying, WANG Dong. Effects of basal fertilization in strips at different soil depths on flag leaf senescence and photosynthetic characteristics, grain yield and fertilizer use efficiency of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(5):813 - 821. (in Chinese)
[13] SAEED U, WAJID S A, KHALIQ T, et al. Optimizing irrigation and nitrogen for wheat through empirical modeling under semi-arid environment[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(12):11663 - 11676.
[14] 赵连佳,薛丽华,孙乾坤,等. 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.
ZHAO Lianjia, XUE Lihua, SUN Qiankun, et al. Effect of different irrigation and nitrogen application on water consumption characteristics and the water and nitrogen use efficiencies under drip irrigation in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016,36(8):1050 - 1059. (in Chinese)
[15] 刘俊明, 司转运, 武利峰, 等. 高低畦种植模式下水氮耦合对冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 144 - 154.
LIU Junming, SI Zhuanyun, WU Lifeng, et al. Effects of water and nitrogen coupling on winter wheat yield and water or nitrogen use efficiency under high-low seedbed cultivation pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8): 144 - 154. (in Chinese)
[16] QIN W L, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Crop rotation and N application rate affecting the performance of winter wheat under deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210:330 - 339.
[17] 刘国伟,任艳云,闫璐. 土壤肥力和灌水量组合对不同类型小麦光合特性及产量的影响[J]. 农学学报,2017,7(6):27 - 33.
LIU Guowei, REN Yanyun, YAN Lu. Combination of soil fertility and irrigation: effect on photosynthetic characteristics and yield of different-type wheat[J]. Journal of Agriculture,2017,7(6):27 - 33. (in Chinese)
[18] 张素瑜,黄洁,杨明达,等. 氮肥基追比和调亏灌溉对小麦水分利用效率和产量的影响[J]. 作物杂志,2019(4):94 - 99.
ZHANG Suyu, HUANG Jie, YANG Mingda, et al. Effects of base-topdressing ratio of nitrogen fertilizer and regulated deficit irrigation on water use efficiency and yield of wheat[J]. Crops,2019(4):94 - 99. (in Chinese)
[19] 李春喜,杨明达,马守臣,等. 氮肥基追比对冬小麦调亏灌溉的调控作用[J]. 麦类作物学报,2015,35(6):820 - 828.
LI Chunxi, YANG Mingda, MA Shouchen, et al. Effect of the nitrogen fertilizer ratio of basal application and top dressing on physiological traits and yield of winter wheat under regulated deficit irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops,2015,35(6): 820 - 828. (in Chinese)
[20] 刘俊明,高阳,司转运,等. 栽培方式对冬小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(1): 210 - 216.
LIU Junming, GAO Yang, SI Zhuanyun, et al. Effects of cultivation methods on water consumption, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(1):210 - 216. (in Chinese)
[21] LU J S, HU T T, GENG C M, et al. Response of yield, yield components and water-nitrogen use efficiency of winter wheat to different drip fertigation regimes in Northwest China[J]. Agricultural Water Management,2021,255:107034.
[22] WANG Z Q, ZHANG W Y, BEEBOUT S S, et al. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates[J]. Field Crop Research,2016, 193:54 - 69.
[23] LI Y,HUANG G H,CHEN Z J, et al. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest China[J]. Agricultural Water Management,2022,260:107277.
[24] WANG C Y, LIU W X, LI Q X, et al. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions[J]. Field Crops Research, 2014, 165:138 - 149.
[25] 王东博,王书吉,韩玉薪. 不同调亏灌溉模式对冬小麦生长、生理及产量的影响[J]. 节水灌溉,2021(8):8 - 12,18.
WANG Dongbo, WANG Shuji, HAN Yuxin. Effects of different regulated deficit irrigation modes on growth, physiology and yield of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation,2021(8):8 - 12,18. (in Chinese)
[26] BUCKLEY T N, SACK L, FARQUHAR G D. Optimal plant water economy[J]. Plant Cell Environment, 2017, 40(6): 881 - 896.
[27] WANG X B,WANG L F, SHANGGUAN Z P. Leaf gas exchange and fluorescence of two winter wheat varieties in response to drought stress and nitrogen supply[J]. PloS One,2016,11(11):0165733.
[28] ABUBAKAR S A, HAMANI A K M, WANG G S, et al. Growth and nitrogen productivity of drip-irrigated winter wheat under different nitrogen fertigation strategies in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture,2023,22(3):908 - 922.
[29] 张娜,张永强,李大平,等. 滴灌量对冬小麦光合特性及干物质积累过程的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(6):795 - 801.

ZHANG Na, ZHANG Yongqiang, LI Daping, et al. Effect of drip irrigation amount on photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(6):795 – 801. (in Chinese)

[30] 黄彩霞,柴守玺,赵德明,等. 灌溉对干旱区冬小麦干物质积累、分配和产量的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(12):1333 – 1344.
HUANG Caixia, CHAI Shouxi, ZHAO Deming, et al. Effects of irrigation on accumulation and distribution of dry matter and grain yield in winter wheat in arid regions of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2014,38(12):1333 – 1344. (in Chinese)

[31] 王晓雨,王小平,史文宇,等. 拔节期冬小麦光合特性、干物质积累和产量对干旱胁迫的响应[J]. 新疆农业科学,2023,60(9):2163 – 2172.
WANG Xiaoyu, WANG Xiaoping, SHI Wenyu, et al. Responses of photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield to drought stress in winter wheat at jointing stage[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2023,60(9):2163 – 2172. (in Chinese)

[32] 王桂良,叶优良,李欢欢,等. 施氮量对不同基因型小麦产量和干物质累积的影响[J]. 麦类作物学报,2010,30(1):116 – 122.
WANG Guiliang, YE Youliang, LI Huanhuan, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on grain yield and dry matter accumulation for different genotypes of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2010,30(1):116 – 122. (in Chinese)

[33] 张杰,王备战,冯晓,等. 氮肥调控对冬小麦干物质量、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(4):516 – 520.
ZHANG Jie, WANG Beizhan, FENG Xiao, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(4):516 – 520. (in Chinese)

[34] 曹彩云,党红凯,郑春莲,等. 水肥管理模式对小麦氮素吸收及转运的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(11):1 – 14.
CAO Caiyun, DANG Hongkai, ZHENG Chunlian, et al. Effect of irrigation and fertilizer management mode on nitrogen uptake and transfer of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2022,42(11):1 – 14. (in Chinese)

[35] LI Q Q, BIAN C Y, LIU X H, et al. Winter wheat grain yield and water use efficiency in wide-precision planting pattern under deficit irrigation in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153:71 – 76.

[36] 胡梦芸,门福圆,张颖君,等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展[J]. 麦类作物学报,2016,36(3):332 – 340.
HU Mengyun, MEN Fuyuan, ZHANG Yingjun, et al. Research progress on water-nitrogen interaction and its effects on crop growth and utilization of nitrogen[J]. Journal of Triticeae Crops,2016,36(3):332 – 340. (in Chinese)

[37] JIANG Q, DU Y L, TIAN X Y, et al. Effect of panicle nitrogen on grain filling characteristics of high-yielding rice cultivars [J]. European Journal of Agronomy,2016,74:185 – 192.

[38] LENKA S, SINGH A K, LENKA N K. Water and nitrogen interaction on soil profile water extraction and ET in maize-wheat cropping system[J]. Agricultural Water Management,2009,96(2):195 – 207.

[39] 丛鑫,张立志,徐征和,等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(3):315 – 324.
CONG Xin,ZHANG Lizhi, XU Zhenghe, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):315 – 324. (in Chinese)

[40] HUANG M, ZHOU X F, CAO F B, et al. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon and nitrogen in an irrigated rice-based cropping system[J]. Paddy and Water Environment,2016,14(2):367 – 371.

[41] DUAN J Z, SHAO Y H, HE L, et al. Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat[J]. Science of the Total Environment,2019,697:134088.

[42] 何平如,俞双恩,丁继辉,等. 农田水位与施氮对拔节孕穗期受涝后冬小麦的调控效应[J]. 农业机械学报,2024,55(7):373 – 385.
HE Pingru, YU Shuang'en, DING Jihui, et al. Regulation effects of farmland water level and nitrogen application on winter wheat after waterlogging at jointing and booting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):373 – 385. (in Chinese)