

李晓航, 王映红, 蒋志凯. 不同水氮供应模式对强筋小麦植株生长、品质及水、氮利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(9): 1751-1760.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.09.010

不同水氮供应模式对强筋小麦植株生长、品质及水、氮利用的影响

李晓航, 王映红, 蒋志凯

(新乡市农业科学院, 河南 新乡 453004)

摘要: 为探究强筋小麦春季适宜的水氮管理时间和施氮量, 本研究以黄淮麦区南片国审强筋小麦品种新麦45为研究对象, 采用裂区试验设计安排田间试验, 主区设置拔节期(W1)、拔节后7 d(W2)、拔节后14 d(W3)3个水肥管理时间, 灌水量均为60 mm; 副区设置150.0 kg/hm²(N1)、187.5 kg/hm²(N2)和225.0 kg/hm²(N3)3个施氮水平(纯N), 共计9个水氮供应模式, 分析比较不同处理小麦关键生育期株高、叶面积指数、地上部干物质重、籽粒产量、加工品质、水分利用效率以及收获时土壤中微生物生物量碳、氮、磷含量。结果显示, 小麦株高、叶面积指数、地上部干物质重、籽粒产量随水肥管理时间延迟总体上呈现先增加后降低的趋势; 相同水氮管理时间, 总体上小麦株高、叶面积指数、地上部干物质重随施氮量增加而增加。W2N2处理籽粒产量最高, 为10 134.5 kg/hm², 显著高于其他处理($P < 0.05$)。同一水肥管理时间, N2处理、N3处理土壤硝态氮含量显著高于N1处理($P < 0.05$); 相同施氮水平, 土壤微生物生物量碳、氮、磷含量均随水肥管理时间的推迟呈先增加后减少的变化规律。小麦水分利用效率主要受水肥管理时间的影响, 随着水肥管理时间的推迟水分利用效率先增加后减少, 拔节后7 d适当增施氮肥对水分利用效率的提升效果最好。W2N3处理小麦籽粒加工品质的综合评价价值最高。综合考虑不同处理强筋小麦籽粒产量、加工品质、水氮耦合等性状的表现, 建议在小麦拔节后7 d(W2)进行水肥管理, 同时追施氮肥(纯N)187.5 kg/hm²(N2)。本试验结果表明, W2N2处理是中国黄淮麦区强筋小麦产业提质增效的可行性栽培措施。

关键词: 强筋小麦; 水氮供应模式; 水分利用效率; 品质; 产量

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)09-1751-10

Effects of different water and nitrogen supply regimes on plant growth, grain quality, and water-nitrogen utilization in high-gluten wheat

LI Xiaohang, WANG Yinghong, JIANG Zhikai

(Xinxiang Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453004, China)

Abstract: To explore the optimal water and nitrogen management period and nitrogen application rate in spring for high-gluten wheat, this study took Xinmai 45, a national-approved high-gluten wheat variety in the southern Huang-Huai region, as the research object. A field experiment was conducted using a split-plot design. The main plots were set with three

water and fertilizer management periods: jointing stage (W1), seven days after jointing (W2), and 14 days after jointing (W3), with an irrigation amount of 60 mm for each period. The subplots were set with three nitrogen application levels: 150.0 kg/hm² (N1), 187.5 kg/hm² (N2), and 225.0 kg/hm² (N3), resulting in a total of nine water and nitrogen supply modes. The plant height, leaf area index, aboveground dry matter weight, grain yield, processing

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 河南省重点研发项目(231111112900); 国家小麦产业技术体系建设专项(CARS-3-2-35); 河南省现代农业产业技术体系建设专项(HARS-22-01-Z3)

作者简介: 李晓航(1987-), 女, 河南安阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事小麦育种及栽培研究。(E-mail) li.xiaohang@163.com

通讯作者: 蒋志凯, (E-mail) 410733138@qq.com

quality, water use efficiency, and contents of microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the soil at harvest were analyzed and compared under different treatments. The results showed that wheat plant height, leaf area index, aboveground dry matter weight, and grain yield first increased and then decreased with the delay of water and fertilizer management periods. At the same water and nitrogen management period, wheat plant height, leaf area index, and aboveground dry matter weight generally increased with the increase of nitrogen application rate. The W2N2 treatment achieved the highest grain yield of 10 134.5 kg/hm², which was significantly higher than other treatments ($P < 0.05$). At the same water and fertilizer management period, the soil nitrate nitrogen content in N2 and N3 treatments was significantly higher than that in N1 treatment ($P < 0.05$). At the same nitrogen application level, the contents of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus first increased and then decreased with the delay of water and fertilizer management periods. Wheat water use efficiency was mainly affected by the water and fertilizer management period, first increasing and then decreasing with the delay of the period. The application of nitrogen fertilizer during the W2 period had the best effect on improving water use efficiency. The W2N3 treatment achieved the highest comprehensive evaluation score for wheat grain processing quality. Based on a comprehensive evaluation of traits including grain yield, processing quality, and water-nitrogen coupling in high-gluten wheat under different treatments, it is recommended to conduct water and fertilizer management at seven days after jointing (W2), coupled with a top-dressing of 187.5 kg/hm² of nitrogen (N2). The results of this experiment demonstrate that the W2N2 treatment is a feasible cultivation measure to improve the quality and efficiency of the high-gluten wheat industry in the Huang-Huai wheat region of China.

Key words: high-gluten wheat; water and nitrogen supply regimes; water use efficiency; quality; yield

小麦是中国粮食安全重要保障,是人类必需的能量和蛋白质来源,随着居民对小麦加工制品的消费不断升级,对优质专用小麦的产量和品质提出了更高要求^[1]。目前国内强筋小麦品种的区域适应性、稳定性以及栽培管理等方面存在不足,导致中国强筋小麦的品质达标率不高。因此,通过调控外界水肥环境条件实现强筋小麦的稳产优质,一直是重要的研究方向^[2]。氮是蛋白质的重要组成元素,适量增施氮肥可促进小麦植株对氮素的吸收和代谢,提高蛋白质和面筋含量,改善小麦的加工品质^[3]。然而过量施用氮肥不仅会使小麦植株徒长,增加倒伏风险,加重病虫害危害,还会影响小麦的抗逆性和加工品质,造成籽粒蛋白质含量过高、面筋质量变差等问题。由此可见,不能仅依靠增加施氮量来保障强筋小麦的产量和品质,而应实施适宜的水肥管理措施。科学的水肥管理不仅能在保证强筋小麦稳产优质的基础上提升水、肥利用效率,还能有效避免因氮素淋溶污染水源造成的农田生态系统失衡、地下水硝酸盐污染等农业面源污染问题,从而实现冬小麦农业经济效益与生态效益的统一。

水和氮是影响小麦产量和品质的两大主要因素,虽然前人研究涉及很多拔节期水肥耦合试验,但由于试验布置区域的地力、种植模式、气候因子等不同,研究结果也有差异^[4-5]。代新俊等^[6]对小麦追氮时期的研究发现,不增加人工成本的氮肥后移技术对提升小

麦中后期的干物质转运、产量提升和氮肥利用效率作用显著。吴强等^[7]研究发现,拔节期施氮量 180 kg/hm²是对冬小麦的产量和品质正负效应的临界点,但柏军兵等^[8]的研究结果显示,施氮量显著正效应范围为 150~300 kg/hm²,大于 300 kg/hm²则会引起小麦产量和品质的降低。冬小麦成穗数随着春季灌溉时间的延迟呈现先增加后减少的趋势,小麦灌浆期叶面积指数在推迟春灌一水时衰退减缓^[9]。通常提升冬小麦籽粒产量以及蛋白质含量、湿面筋含量和稳定时间等品质指标的栽培措施包括适宜的施氮量或者在不增加施氮量的基础上增加生育后期的氮肥占比^[10-11]。Fan 等^[12]研究发现,与在拔节期灌溉相比,推迟 10 d 灌溉小麦表现出延迟花后叶片衰老、延缓叶绿素降解、提升叶片净光合速率的特点,这些特点均有助于产量的提升,但过度推迟灌溉时间则会限制增产。对比冬小麦拔节期灌溉处理与孕穗期灌溉处理可知,前者小麦籽粒产量更高^[13]。当前,多数研究汇集在水肥一体化措施和氮肥后移对冬小麦产量和品质的影响,而水肥同时后移对强筋小麦加工品质以及水、氮利用率的影响研究偏少^[14-16]。黄淮麦区东西横跨多省,气候、土壤等生态条件,农民的种植习惯和加工业需求等均存在差异,因此,应根据种植区域特定生态条件和强筋小麦遗传特性、生长状况等因素,科学确定水氮管理时期和氮肥施用量。本研究设置不同春季水肥管理时间和不同施氮水平,探究春季水

肥管理时间和施氮水平对强筋小麦农艺性状、品质特性、产量以及水、氮吸收利用情况的影响,最终确定适宜的施氮量和水肥管理时间,为实现黄淮麦区强筋小麦增产增效、可持续发展提供科学的栽培技术。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验于 2020 年 10 月至 2021 年 6 月在河南省新乡市农业科学院辉县试验基地(35°27'N, 113°45'E)开展,该基地海拔 85 m,常年平均气温 14 °C,全年平均降水量 589.1 mm;土质为壤土,土壤有机质含量 1.42%,全氮含量 1.09 g/kg,速效磷含量 11.39 mg/kg,速效钾含量 111.4 mg/kg, pH 值为 8.36, 0~200 cm 土层容重 1.45 g/cm³,田间最大持水量为 32.3%。小麦整个生育期内气温和有效降水量如图 1 所示。

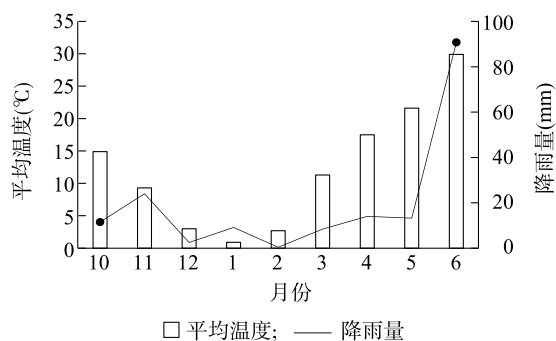


图 1 2020-2021 小麦生育期气温和有效降雨量

Fig. 1 Temperature and effective precipitation during the wheat growth period from 2020 to 2021

1.2 试验设计

供试冬小麦为强筋小麦品种新麦 45, 2020 年 10 月 17 日播种。根据二因素裂区试验设计要求,主区为水肥管理时间,2021 年 3 月 12 日试验区小麦进入拔节期,进行第 1 次灌溉施肥(W1),推迟 7 d 即 2021 年 3 月 19 日进行第 2 次灌溉施肥(W2),推迟 14 d 即 2021 年 3 月 26 日进行第 3 次灌溉施肥(W3),采用水表严格控制单次灌溉量(60 mm)。作为副区的 3 个氮肥追施水平(纯 N)分别为 150.0 kg/hm²(N1)、187.5 kg/hm²(N2)、225.0 kg/hm²(N3),具体试验方案见表 1。播种前整地施基肥(N 含量:P₂O₅含量:K₂O 含量为 18:22:5),基肥用量为 750 kg/hm²,病虫害防治等管理措施同当地大田生产。本试验采用奥地利农业技术公司生产的 Wintersteiger 小区播

种机精准播种,播种量为 150 kg/hm²,小区面积为 13.5 m²,9 个处理,3 次重复,共 27 个小区随机区组排列,各个小区之间设置 1.5 m 宽的隔离小区,隔离小区正常播种和田间管理,但拔节期不灌溉不施肥。2021 年 6 月 5 日小麦成熟,采用小型收割机进行全小区收获。

表 1 各试验处理水肥管理时间和施氮量

Table 1 Water and fertilizer management timing and nitrogen application rate for each treatment

水肥管理时间 (年-月-日)	施氮量 (kg/hm ²)	处理编码
2021-03-12	150.0	W1N1
	187.5	W1N2
	225.0	W1N3
2021-03-19	150.0	W2N1
	187.5	W2N2
	225.0	W2N3
2021-03-26	150.0	W3N1
	187.5	W3N2
	225.0	W3N3

1.3 测定项目及方法

1.3.1 强筋小麦生长发育指标的测定 在小麦孕穗期(BS)、扬花期(FS)和成熟期(RS),从各小区随机选取 15 株具有代表性的植株,采用精度为 0.1 cm 的钢尺测定株高及叶片长、宽,并计算叶片面积和叶面积指数(LAI)。其中,叶面积指数的测定方法为:先量取每株小麦所有叶片的最大长度与宽度,按照单片叶面积=叶片长×叶片宽×0.75 计算单片叶面积;同时调查各小区单位面积小麦总茎蘖数,再通过叶面积指数(LAI)=(单株叶面积×单位面积总茎蘖数)/单位面积计算出叶面积指数^[17]。对于植株地上部分,保留全部试验样本,先置于 105 °C 烘箱中杀青 0.5 h,随后将烘箱温度调至 80 °C 烘干至恒重,称量其干物质重量,最后结合取样株数换算得到地上部分干物质总重量。

1.3.2 强筋小麦水分利用效率的测定 小麦水分利用率计算公式为:水分利用率=籽粒产量/生育期总耗水量。其中,生育期总耗水量(ET)按公式“ $ET=I+P+U-D-R\pm\Delta SWS$ ”计算^[18],公式中 I 表示生育期内灌水量(mm);P 为生育期内总降水量(mm);U 为生育期内地下水补给量(mm);D 为深层渗漏量(mm);R 为径流量(mm); ΔSWS 为播种前与收获后 0~200 cm 土层的土壤贮水量变化量

(mm)。鉴于本试验田块地势平坦,深层土壤水分变化较小,计算 ET 时可忽略 U 、 D 、 R 这 3 项。

1.3.3 土壤硝态氮及土壤微生物生物量碳、氮、磷的测定 在冬小麦收获期,从每个小区随机选取 3 个采样点,采集 0~20 cm 土层的土壤样品,清除杂质后混匀,过 2 mm 孔径筛,用于测定土壤微生物生物量。土壤硝态氮含量利用 KCl 浸提剂(天津科密欧化学试剂有限公司产品)处理并稀释后,加入 10% H_2SO_4 试剂(上海阿拉丁生化科技股份有限公司产品)酸化,采用分光光度计(上海仪电集团有限公司产品)检测^[19]。土壤微生物量碳和土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸-TOC 法分析^[20],土壤微生物磷则参照氯仿熏蒸- $NaHCO_3$ 提取法处理后,通过电感耦合等离子体(ICP)测定^[21]。

1.3.4 强筋小麦籽粒加工品质测定 首先,将收获的小麦籽粒用 Brabender 公司生产的磨面机制成面粉。面筋含量参照《小麦粉湿面筋测定法》(GB/T 14608-1993),使用瑞典波通仪器公司生产的 GM-2200 型面筋测定仪测定;沉降值按照《小麦粉沉降值测定法》(GB/T 15685-1995),采用 LYZY-2 型沉降值测定仪(杭州大吉光电仪器有限公司产品)测定;面团粉质参数(包括吸水率、面团形成时间、面团稳定时间等)参考国际通用方法 AACC-54-21,利用 Brabender 公司生产的粉质仪测定;面团烘焙特性参数(如延伸性、拉伸阻力、拉伸面积等)按照国际标准 AACC-54-10,使用 Brabender 公司生产的拉伸仪测定^[22-23]。为了获得各处理小麦籽粒加工品质的最优组合,本研究利用相关性分析和主成分分析将 9 个不同处理的 8 个加工品质指标进行降维,然后采用模糊数学隶属函数法计算各个处理所选择指标的隶属函数值,对所选指标隶属函数值求和,最后求取平均值,依据平均值的大小进行位次排列^[24]。

1.3.5 强筋小麦籽粒产量及其构成因素的测定

小麦产量构成因素包括单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重,其中单位面积有效穗数、每穗粒数在小麦成熟期调查,在各小区选取 1 m 双行样段进行田间实地测定。单位面积产量测定方法:在每个小区选取 3 个 1 m² 区域,将其中麦穗全部收获后脱粒、晒干、称重,据此折算单位面积产量。千粒重测定方法:从各小区收获的籽粒中随机数 1 000 粒称重,重复 3 次,取平均值作为该小区小麦籽粒的千粒重。

1.4 数据处理与统计分析

采用 SPSS 软件对试验数据进行双因素差异分析、主成分分析和隶属函数分析,利用 Excel 2016 进行数据整理与统计分析,通过 Origin Pro 2021 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同处理对强筋小麦叶面积、株高和地上部干物质重的影响

从表 2 可知,冬小麦孕穗期和扬花期叶面积指数受水肥管理时间和施氮量两个因素的显著或极显著影响。小麦孕穗期、扬花期和成熟期株高均受到灌水时间影响且均达极显著水平($P < 0.01$),施氮量对扬花期和成熟期小麦株高影响达极显著水平($P < 0.01$);孕穗期、扬花期、成熟期的地上部干物质重受灌水时间极显著影响($P < 0.01$),而施氮量则对扬花期和成熟期地上部干物质重影响极显著($P < 0.01$),对孕穗期地上部干物质重无显著影响($P > 0.05$);水肥管理时期和施氮量两者的交互作用只对成熟期株高影响极显著($P < 0.01$),而对其他生育期株高、叶面积指数和地上部干物质重影响不显著($P > 0.05$)。

表 2 冬小麦叶面积指数、株高、地上部干物质重方差分析结果

Table 2 Analysis of variance for winter wheat leaf area index, plant height, and aboveground dry matter weight

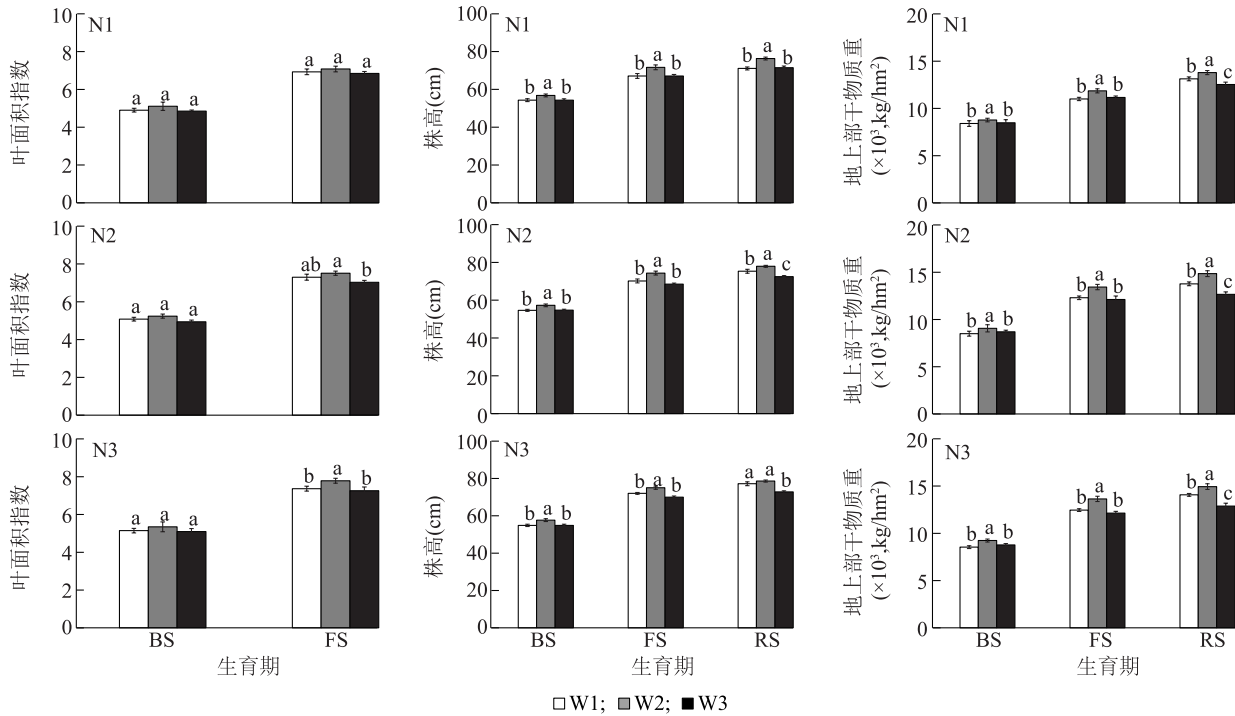
小麦生育期	影响因素	叶面积指数	株高	地上部干物质重
BS	W	8.019 **	66.107 **	9.836 **
	N	6.031 *	ns	ns
	W×N	ns	ns	ns
FS	W	20.242 **	96.09 **	68.567 **
	N	30.311 **	47.37 **	99.353 **
	W×N	ns	ns	ns
RS	W	-	121.84 **	119.40 **
	N	-	42.87 **	25.68 **
	W×N	-	9.93 **	ns

BS:孕穗期;FS:扬花期;RS:成熟期;W:水肥管理时间;N:施氮量;W×N:水肥管理时间和施氮量的交互作用。*表示在 0.05 水平影响显著;**表示在 0.01 水平影响极显著;ns 表示在 0.05 水平影响不显著;-表示此项无数据。

从图 2 可见,冬小麦的叶面积指数、株高、地上部干物质重随着冬小麦生育进程的不断推进而逐步增加。相同施氮量条件下,随着水肥管理时间的推迟,冬小麦株高、地上部干物质重在孕穗期、扬花期、成熟期整体呈现先上升后下降的趋势,其中 W2 处理高于 W1

处理、W3 处理,由此可知,适当的土壤水分可提高冬小麦地上部形态特征。扬花期叶面积指数最高值出现在 W2N3 处理,与 W2N1、W2N2 处理间差异不明显,但显著高于 W1N3 处理和 W3N3 处理($P<0.05$);W2N3 处

理成熟期株高为 78.6 cm,但与 W2N1、W2N2 处理差异不显著;成熟期 W2N3 处理地上干物质重为 1.467×10^4 kg/hm²,显著高于 W1N3 处理、W3N3 处理($P<0.05$)。



BS,FS,RS 见表 2 注;W1、W2、W3、N1、N2、N3 见表 1。图柱上不同小写字母表示相同施氮量、同一生育期不同灌溉时间处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同处理冬小麦叶面积指数、株高、地上干物质重

Fig.2 Leaf area index, plant height, and aboveground dry matter weight of winter wheat under different treatments

2.2 不同处理对土壤硝态氮含量及土壤微生物生物量碳、氮、磷含量的影响

从表 3 可知,同一水肥管理时间,N2 处理、N3 处理土壤硝态氮含量显著高于 N1 处理($P<0.05$),而 N2 处理和 N3 处理之间差异不显著($P>0.05$)。各处理土壤微生物生物量碳含量差异不显著($P>0.05$),处于 280.8 mg/kg 至 294.5 mg/kg。相同施氮水平,土壤微生物生物量碳、氮、磷含量均随水肥管理时间的推迟呈先增加后减少的变化规律,土壤微生物生物量氮含量和土壤微生物生物量磷含量均为 W2N3 处理达到峰值。在同一水肥管理时间,随着施氮量的增加土壤微生物生物量磷含量也随之提升,N2 处理、N3 处理土壤微生物生物量磷含量显著高于 N1 处理($P<0.05$)。从表 4 可知,W 和 N 两个因素对土壤中微生物生物量氮、磷含量均有极显著影响($P<0.01$),W 和 N 两个因素交互作用对土壤硝态氮含量及微生物生物量碳、氮、磷含量的影响

均不显著($P>0.05$)。

表 3 不同处理土壤硝态氮及土壤微生物生物量碳、氮和磷含量

Table 3 Contents of soil nitrate nitrogen and microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus under different treatments

处理	硝态氮含量 (mg/kg)	土壤微生物生物量碳含量 (mg/kg)	土壤微生物生物量氮含量 (mg/kg)	土壤微生物生物量磷含量 (mg/kg)
W1N1	12.3b	280.8a	31.6b	2.23b
W1N2	13.9a	290.6a	36.5ab	2.71a
W1N3	14.5a	289.5a	39.3a	2.89a
W2N1	12.5b	283.1a	39.4a	2.46b
W2N2	14.1a	294.5a	44.2a	3.12a
W2N3	14.8a	292.8a	45.2a	3.29a
W3N1	12.2b	282.8a	36.6b	2.32b
W3N2	13.7a	293.3a	40.9a	2.83a
W3N3	14.2a	290.2a	41.8a	2.99a

W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 见表 1。相同灌溉时间同列数据后不同小写字母表示不同施氮量之间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 不同处理土壤硝态氮含量及土壤微生物生物量碳、氮、磷含量的方差分析结果

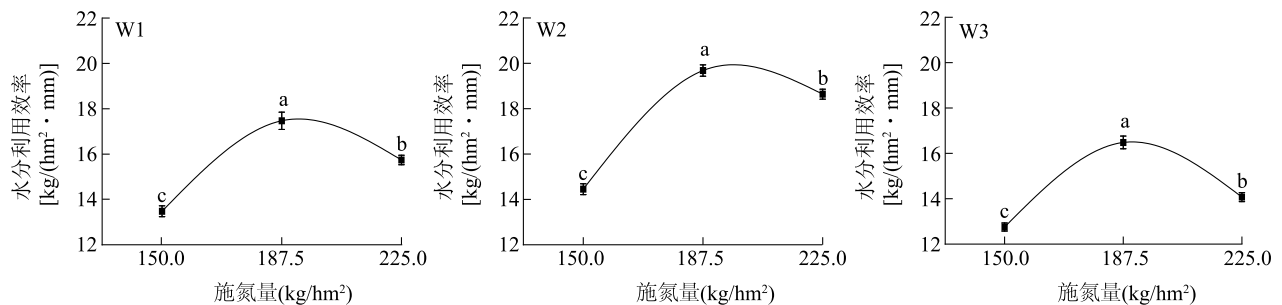
Table 4 Analysis of variance for soil nitrate nitrogen, microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus contents under different treatments

处理	硝态氮含量	微生物生物量碳含量	微生物生物量氮含量	微生物生物量磷含量
W	ns	ns	**	**
N	**	*	**	**
W×N	ns	ns	ns	ns

W、N、W×N 见表 2 注, ns 表示变量效应不显著, * 表示在 0.05 水平变量效应显著, ** 表示在 0.01 水平变量效应极显著。

2.3 不同处理对强筋小麦水分利用效率的影响

本试验结果(图 3)显示,小麦水分利用效率



W1、W2、W3 见表 1。图中数据为平均值,曲线上不同小写字母表示不同施氮量处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 不同处理对强筋小麦水分利用效率的影响

Fig.3 Effects of different treatments on water use efficiency of high-gluten wheat

2.4 不同处理对强筋小麦籽粒加工品质的影响

从表 5 可见,W1 处理和 W2 处理随着施氮量的增加,籽粒吸水量呈上升趋势,且 N2 处理和 N3 处理显著高于 N1 处理($P < 0.05$),但 N2 处理和 N3 处理之间差异不显著($P > 0.05$),W3N1 处理、W3N2 处理、W3N3 处理小麦籽粒吸水率差异不显著($P > 0.05$)。相同水肥管理时间,面团形成时间、面团稳定时间、面团拉伸面积、面团延伸性、面团拉伸阻力、面筋含量等加工品质参数均随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,并且以 W2N2 处理达到峰值。这说明适当推迟拔节期水肥管理时间,同时适当提高施氮量有助于提升强筋小麦的加工品质。

从表 6 可知,W1 处理和 W2 处理综合评价随着施氮量的增加而增大,且以 W2 处理下不同施氮水平的综合评价均高于 W1 处理。综合评价最高的处理为 W2N3 处理,排名第 1,综合评价最低的处理为 W1N1,排名第 9,各处理综合评价大小顺序为 W2N3 > W2N2 > W3N2 > W3N3 > W3N1 > W2N1 >

主要受水肥管理时间的影响。从图 3 可见,随着水肥管理时间的推后,水分利用效率先增加后减少,W2 处理平均水分利用效率比 W1 处理和 W3 处理更高;相同水肥管理时间,小麦水分利用效率随施氮量的增加呈先上升后下降趋势,3 个水肥管理时间均表现为 N2 > N3 > N1,且 3 个处理之间差异均达显著水平($P < 0.05$)。施氮量由 150.0 kg/hm² (N1 处理)增加至 225.0 kg/hm² (N3 处理)时水分利用效率变幅最大的是水肥管理时间 3 月 19 日(W2 处理),表明在适宜的水肥管理时间(W2 处理)下适当增施氮肥对水分利用效率的提升效果最好。

W1N3 > W1N2 > W1N1。

2.5 不同处理对强筋小麦产量的影响

从表 7 可见,在相同水肥管理时间,籽粒产量随施氮量的增加表现出先升高后降低的趋势,其中 W2N2 处理小麦籽粒产量最高,为 10 134.5 kg/hm²,显著高于 W2N1 处理、W2N3 处理;3 个水肥管理时间相比,W2 处理小麦籽粒平均产量最高,达 9 751.5 kg/hm²,较 W1 处理小麦籽粒平均产量、W3 处理小麦籽粒平均产量分别提高 17.52%、12.28%。W2 处理小麦千粒重显著高于 W1 处理和 W3 处理($P < 0.05$);相同水肥管理时间,不同施氮量处理间籽粒千粒重差异均不显著($P > 0.05$)。

从表 8 的方差分析结果可知,冬小麦穗数受到水肥管理时间以及水肥管理时间与施氮量互作效应的显著影响($P < 0.05$);小麦穗粒数受施氮量极显著影响($P < 0.01$),受水肥管理时间与施氮量互作效应显著影响($P < 0.05$);千粒重受水肥管理时间极显著影响($P < 0.01$);产量同时受到水肥管理时间、施氮量以及两者交互作用的极显著影响($P < 0.01$)。

表 5 不同处理对强筋小麦籽粒加工品质的影响

Table 5 Effects of different treatments on grain processing quality of high-gluten wheat

处理	籽粒吸水量 (mL/g)	面团形成时间 (min)	面团稳定时间 (min)	面团拉伸面积 (cm ²)	面团延伸性 (mm)	面团拉伸阻力 (EU)	面筋含量 (%)	沉降值 (mL)
W1N1	0.654b	15.1b	17.1b	141.3b	156.7b	576.0b	31.2b	37.1a
W1N2	0.663a	16.2a	17.9a	156.3a	166.4a	588.2a	33.5a	38.7a
W1N3	0.666a	15.6ab	17.3ab	149.7a	162.2ab	581.2ab	32.4ab	38.0a
W2N1	0.670b	16.7b	18.2b	157.0b	165.3b	579.4b	33.0c	39.1b
W2N2	0.682a	18.1a	19.1a	168.0a	175.6a	594.6a	36.0a	41.9a
W2N3	0.685a	17.5ab	18.6ab	161.7b	168.7b	582.8ab	34.2b	39.7ab
W3N1	0.672a	16.0b	18.1b	145.0b	161.4b	579.9b	34.1b	37.8c
W3N2	0.677a	16.6a	18.7a	157.3a	170.9a	586.2a	35.3a	40.4a
W3N3	0.671a	16.1ab	18.2ab	151.3b	163.0b	580.2b	34.8ab	39.5b

W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 见表 1,相同灌溉时间同列数据后不同小写字母表示不同施氮量之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 6 不同处理下强筋小麦品质评价综合指标值、权重、隶属函数值、综合评价值

Table 6 Comprehensive indicator values, weights, membership function values and comprehensive evaluation scores for quality evaluation of high-gluten wheat under different treatments

处理	综合指标值		隶属函数值		综合评价值	排名
	PC1	PC2	u(x1)	u(x2)		
W1N1	-1.54 240 813	-0.79 689 236	0	0.139 162 988	0.010 674 847	9
W1N2	-1.24 919 703	1.20 330 995	0.103 265 951	0.779 069 074	0.155 104 016	8
W1N3	-0.98 346 948	-0.13 229 138	0.196 852 476	0.351 782 586	0.208 734 659	7
W2N1	0.14 354 964	-0.27 133 850	0.593 777 085	0.307 298 537	0.571 795 627	6
W2N2	0.69 068 498	1.89 389 027	0.786 472 556	1.000 000 000	0.802 843 239	2
W2N3	1.29 697 017	-0.32 843 463	1.000 000 000	0.289 032 304	0.945 452 656	1
W3N1	0.46 576 600	-1.23 188 452	0.707 258 392	0	0.652 998 735	5
W3N2	0.65 786 376	0.36 278 655	0.774 913 258	0.510 168 255	0.754 596 975	3
W3N3	0.52 024 201	-0.69 915 166	0.726 444 285	0.170 432 259	0.683 786 155	4
指标权重			0.923 281 706	0.076 707 516		

W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 见表 1;PC1:主成分 1,PC2:主成分 2;x1、x2 对应基于主成分分析等确定的不同品质影响因素维度。

表 7 不同处理对强筋小麦产量及构成因素的影响

Table 7 Effects of different treatments on grain yield and its components in high-gluten wheat

处理	穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
W1N1	621.1bc	33.20b	41.88c	8 093.3b
W1N2	636.8 abc	34.41a	42.33c	8 437.7a
W1N3	630.5ab	34.99a	42.12c	8 363.1a
W2N1	632.9bc	34.47a	47.40a	9 097.8c
W2N2	661.5a	35.15a	47.85a	10 134.5a
W2N3	646.5ab	34.57a	47.21a	10 022.2b
W3N1	632.7abc	34.25a	43.34bc	8 610.4b
W3N2	637.9abc	34.87a	44.22b	8 742.4a
W3N3	607.6c	34.25a	43.93b	8 701.3ab

W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3 见表 1,相同灌溉时间同列数据后不同小写字母表示不同施氮量之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 8 不同处理强筋小麦产量及构成因素的方差分析结果

Table 8 Analysis of variance for grain yield and its components in high-gluten wheat under different treatments

处理	穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
W	*	ns	**	**
N	ns	**	ns	**
W×N	*	*	ns	**

W、N、W×N 见表 2 注,ns、*、** 分别表示变量效应不显著、在 0.05 水平和在 0.01 水平显著。

3 讨论

3.1 不同水氮供应模式对强筋小麦植株生长发育指标的影响

前人研究结果表明,冬小麦株高、叶面积指数和地上部干物质重等生长发育指标主要受周围环境中

水、氮因素的影响^[25-28],在拔节期合理水氮管理有助于冬小麦株高、叶面积和地上部干物质增加,水肥管理时间和施氮水平对作物的生长发育耦合效应显著,然而氮肥施用量对促进作物的生长发育表现出阈值效应,即超过阈值的施氮量可能对作物生长产生不利影响^[29-30]。拔节期是冬小麦对水最为敏感的阶段,过度推迟拔节期水肥管理时间引起的水分亏缺效应对冬小麦中后期的生长有明显的抑制作用,造成叶面积减小、株高降低、地上部干物质重下降^[31]。本试验结果表明,推迟拔节期水肥管理时间 7 d(W2 处理)为强筋小麦的生长发育提供了较好的水肥环境,与 W1 处理和 W3 处理相比,不同生育时期株高和地上部干物质重表现出随着水肥管理时间的延迟呈现先增加后降低的变化规律,这与闻磊等^[32]的研究结果相似。表明适当推迟春季水肥管理时间并科学增施氮肥可以增加冬小麦重要生育时期叶面积和株高,进而影响冬小麦的冠层结构及其形成过程,伴随着光能截获量增多和光合作用效率增加,最终体现在冬小麦地上部干物质积累量的提高,为小麦的高产奠定基础。

3.2 不同水氮供应模式对强筋小麦水分利用和土壤养分的影响

本试验发现,在同一水肥管理时间,随着施氮量的增加,耕层土壤中的硝态氮、微生物生物量氮、磷含量均表现出逐渐增加的规律,这与姜丽娜等^[33]的研究结果相似。水肥管理时间从 W2 处理推迟到 W3 处理时,引起土壤中的氮素含量降低,进而影响冬小麦根系养分吸收以及向地上部分的运转,由此可知,W2 处理可以加强水氮互作的调控作用,以便提升冬小麦对氮素的利用水平,这与徐晓峰等^[34]的研究结果一致。本试验结果显示,不同处理对水分利用效率与氮素积累影响结果相似,随着春季水肥管理时间推迟,小麦对水分的利用效率随着施氮量的增加呈现先增加后减少的变化趋势,究其原因一是由于施氮量对小麦产量的提升效果逐渐减弱,即报酬递减法则;二是由于小麦拔节期灌水时间的过度延后引起的干旱胁迫影响到冬小麦早期分蘖和根系的数量,导致冬小麦对水分和养分的吸收能力减弱,最终影响高产的形成。反之适当的水分亏缺可促进小麦根系下扎,加大对土壤水分和养分的利用^[35-36]。本研究结果表明,相较于 W1 处理,W2 处理可提高小麦对水分的利用效率及耕层土壤氮素积

累,但 W3 处理则会造成水分利用率降低。在春季水肥管理时间合理的前提下科学增加施氮量,一方面可以促进小麦对氮素的吸收利用,另一方面可以缓解由于灌溉时间过晚引起土壤养分向下淋溶的消极影响^[37]。

3.3 不同水氮供应模式对强筋小麦产量的影响

小麦植株在拔节期形成次级分蘖和花穗,分蘖数和穗数直接影响小麦的生长发育和最终产量,科学合理进行拔节期水氮管理对实现高产稳产具有重要意义^[38]。杨梅等^[39]的研究结果显示,在小麦拔节期和灌浆期实施灌溉和追施氮肥均可提高千粒重,有助于提高最终产量,尤其是拔节期灌溉追肥可显著影响小麦产量。李娜娜等^[40]的研究结果表明,冬小麦在拔节期进行灌溉,同时追施 240 kg/hm² 氮肥可获得较高产量。另有研究结果表明,土壤肥力较高的地区适宜施氮量为 240 kg/hm²,通过协调产量构成三因素最终实现籽粒高产^[41]。本研究结果显示,3 个水肥管理时间,小麦籽粒产量表现出为先增加后下降的趋势,W2 处理产量最高,W1 处理产量最低,推测是由于 W1 处理灌水时间较早,造成前期群体过大,成穗数不高,最终引起产量偏低;W3 处理水肥管理时间过迟,造成部分分蘖消亡,群体较小,单位面积穗数较少,最终籽粒产量低于 W2 处理。高效的水肥供应有助于提高分蘖数及成穗率,这是产量形成的重要基础^[42]。小麦拔节后如果灌水和追施氮肥较早容易造成其在抽穗开花时缺水、灌浆时间减少,籽粒重量降低;反之灌水和追施氮肥推迟时间过久,则会出现小麦群体因水分和氮肥不足生长受到抑制,而在抽穗开花后水分和氮肥又相对过于充足,造成小麦植株营养生长旺盛,生殖生长不足,贪青晚熟等不良现象。

3.4 不同水氮供应模式对强筋小麦籽粒加工品质的影响

优质强筋小麦籽粒蛋白质含量高,尤其是麦谷蛋白和醇溶蛋白,可增强面筋弹性。在拔节期,适当增施氮肥能促进叶片的氮素同化,增加蛋白质前体物质的合成,从而提高籽粒蛋白质含量及面筋强度;同时,此期科学控水(保持土壤水分在 60%~70%)可抑制籽粒中支链淀粉的过度合成,提高直链淀粉比例,使面粉糊化温度升高、黏度降低,更符合强筋小麦制作面包等发酵食品的需求。若土壤中水分过多,可能导致淀粉颗粒发育不均,影响面团的持气

性^[43]。孙文彦等^[44]研究发现,在适宜范围内增加施氮量,可同时提升小麦产量和品质;但当施氮量超过一定阈值后,产量增长幅度会下降,最终可能出现产量降低而品质提高的现象。董志强等^[45]的研究结果表明,强筋小麦品种在发育后期对氮素需求量大且吸收能力强,提高氮素同化量及其向籽粒的转运量,可系统提升籽粒蛋白质含量和加工品质。本研究通过对9个处理强筋小麦籽粒加工品质的综合评价分析排名发现,W2处理和W3处理小麦籽粒加工品质优于W1处理;相同水肥管理时间,N2处理小麦籽粒加工品质整体优于N1处理。这表明,随着拔节期水氮管理时间的适当延迟并配合增施一定量氮肥,强筋小麦籽粒加工品质的一系列指标会有所提升,但W3处理氮肥的正向调节效应明显减弱,这反映出水氮管理时间和施氮量均与加工品质密切相关。本研究中,晚灌溉增氮的W2N3处理、W2N2处理在加工品质综合排名中分别位列第1位、第2位。其中,W2处理能够兼顾冬小麦拔节期和孕穗期对水分的需求;而W2N2处理相比W2N3处理,籽粒产量的提升在一定程度上引发了养分稀释效应,进而降低了蛋白质含量^[46]。尽管W2N2处理的小麦加工品质位列第2,但其单位面积产量显著高于其他处理($P < 0.05$),实现了小麦高产与优质的协同提升。该处理通过水肥均衡补充减少了品质波动,通过优化氮素运筹和水分调控,既保证了强筋小麦的蛋白质含量与面筋质量,又协调了淀粉组成,最终提升加工品质,因此W2N2处理是黄淮麦区强筋小麦春季提质增产最适宜的水氮运筹措施。

4 结 论

本研究在推迟春季小麦水肥管理时间的前提下,设置不同施氮水平探究不同水氮管理模式对强筋小麦农艺性状、品质特性、产量以及水、氮吸收利用情况的影响,结果表明,适当推迟拔节后水肥管理时间、科学增施氮肥有利于强筋冬小麦在生育后期对氮素的吸收利用,提高水、氮利用效率。W2N2处理籽粒产量高达 $10\ 134.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$,显著高于其他处理($P < 0.05$)。在本研究环境条件下,结合强筋小麦在不同处理的综合表现,为实现其水、氮高效利用,保障强筋小麦提质增产,建议在小麦拔节期推迟7 d进行水肥管理,同时追施氮肥 $187.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。本试验结果为中国黄淮麦区强筋小麦产业健康发展提供

了较优的水氮管理模式。

参 考 文 献:

- [1] 马明明,李迎春,薛 澄,等. 中国冬小麦品质时空变异特征及关键气象因子分析[J]. 麦类作物学报,2023,43(1):113-123.
- [2] 孟凡乔,王 坤,肖广敏,等. 华北平原潮土区粮田氮淋失阻控措施及效果分析[J]. 中国生态农业学报,2021,29(1):141-153.
- [3] 李武超,李 磊,王 炜,等. 小麦水氮耦合效应与水肥高效利用研究[J]. 华北农学报,2018,33(5):232-238.
- [4] 韩惠芳,任玉洁,高 超,等. 推迟灌溉节水对不同种植模式冬小麦产量及品质的影响[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(9):792-797.
- [5] 吴金芝,李淑靖,李国强,等. 拔节期灌溉和追施氮肥对旱地沟播小麦产量和品质的影响[J]. 华北农学报,2023,38(3):100-107.
- [6] 代新俊,夏 清,杨珍平,等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(3):289-294.
- [7] 吴 强,张永平,谢 岷,等. 节水灌溉模式下施肥量对小麦产量和加工品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2021,49(3):9-17.
- [8] 柏军兵,王艳杰,王德梅,等. 强筋小麦产量和品质对不同土壤条件及施氮水平的响应[J]. 作物杂志,2022(1):167-173.
- [9] 柳斌辉,王变银,陈朝阳,等. 春一水灌溉时间对冬小麦产量和生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(2):122-128.
- [10] 杨明晓,吴 伟,张钧浩,等. 不同追氮时期对强筋小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[J]. 河北农业大学学报,2020,43(2):11-18.
- [11] 韩立杰,董伟欣,张月辰. 不同水肥处理对小麦冠层结构、产量和籽粒品质的影响[J]. 浙江农业学报,2020,32(6):953-962.
- [12] FAN Y L, LIU J M, ZHAO J T, et al. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns[J]. Agricultural Water Management,2019,221:371-376.
- [13] 唐 锐,韩宜秀,易树生,等. 不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(10):1944-1955.
- [14] 姚春生,卢崇靖,孙 婉,等. 微喷灌下不同氮肥基追比对冬小麦产量和品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2022,27(10):54-64.
- [15] LI J P, ZHANG Z, YAO C S, et al. Improving winter wheat grain yield and water/nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate[J]. Journal of Integrative Agriculture,2021,20(2):606-621.
- [16] 王 慧,张 晓,朱冬梅,等. 氮肥运筹对晚播强筋小麦产量及品质的效应[J]. 麦类作物学报,2024,44(10):1294-1302.
- [17] 张笑培,王和洲,周新国,等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):

- 19-26.
- [18] 温健,赵贵宾,马彦,等.肥密互作对宽幅匀播旱地冬小麦产量、品质及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2020(5):77-82.
- [19] 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.
- [20] 张娇阳.长芒草植物-土壤-微生物碳氮过程对氮磷添加的协同响应机制[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [21] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(4):319-329.
- [22] 王文政,李亚静,张敏,等.施氮量对强筋小麦光合、产量、蛋白质含量和加工品质的影响[J].麦类作物学报,2024,44(4):462-471.
- [23] 郭双双,张敏,付陈陈,等.灌水量对强筋小麦上三叶氮素代谢和籽粒加工品质的影响[J].麦类作物学报,2023,43(2):205-214.
- [24] 张志恒,王玉琴,任国艳,等.基于主成分分析和隶属函数分析评价不同添加剂处理的玉米秸秆青贮的发酵品质[J].动物营养学报,2022,34(4):2677-2688.
- [25] 王子骞,贾永红,石书兵,等.调亏灌溉对新疆滴灌冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].江苏农业科学,2024,52(24):79-86.
- [26] 范艺璇,吴占今,王晓森,等.基于蒸发皿蒸发量制定的华北地区冬小麦滴灌计划[J].排灌机械工程学报,2024,42(12):1287-1296.
- [27] 李伟,宋睿,刘明江,等.光学遥感在区域灌溉监测中应用的研究进展[J].排灌机械工程学报,2024,42(11):1157-1165.
- [28] 余双双,陈磊,郭冰玲,等.水氮互作对超高产小麦灌浆和衰老特性的影响[J].江苏农业科学,2024,52(16):117-124.
- [29] 李正鹏,宋明丹,冯浩.水氮耦合下冬小麦LAI与株高的动态特征及其与产量的关系[J].农业工程学报,2017,33(4):195-202.
- [30] 周吉红,毛思帅,孟范玉,等.春季灌水和追氮对北京冬小麦生长发育和产量的影响[J].麦类作物学报,2021,41(12):1548-1555.
- [31] 韩东伟,何建宁,李浩然,等.灌水时期对冬小麦个体、群体结构和冠层光合作用的影响[J].江苏农业学报,2022,38(3):577-586.
- [32] 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.
- [33] 姜丽娜,岳影,李金娜,等.施氮量对小麦花后氮素分配及氮素利用的影响[J].作物杂志,2018(2):80-86.
- [34] 徐晓峰,焦念元.氮肥减施对宽幅播种冬小麦产量形成和氮肥利用效率的影响[J].核农学报,2021,35(4):953-959.
- [35] 金修宽,马茂亭,赵同科,等.测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(7):1334-1344.
- [36] 刘志良,李晓爽,曹彩云,等.春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2021,29(8):1296-1304.
- [37] 赵艳,罗铮,杨丽,等.氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2022,42(8):1001-1011.
- [38] 王晓森,吕谋超,王森,等.种植密度和灌溉、施氮模式对冬小麦土壤水分状况、产量和品质的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(9):48-56.
- [39] 杨梅,李雪萌,秦保平,等.水氮运筹对强筋小麦干物质转运与籽粒产量的影响[J].麦类作物学报,2024,44(6):770-779.
- [40] 李娜,刘园,谢迎新,等.水氮对冬小麦花后籽粒淀粉含量及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(1):103-107.
- [41] 吕添,王红光,李东晓,等.不同春生叶龄期追氮对冬小麦产量形成和抗倒性能的影响[J].麦类作物学报,2018,38(7):825-833.
- [42] 郭振清,刘添,张敏,等.减少灌水次数对河北冬性强筋小麦产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2021,41(6):731-737.
- [43] 代新俊,杨珍平,陆梅,等.不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):710-720.
- [44] 孙文彦,宁东峰,李志杰,等.不同灌溉措施对黄淮海地区冬小麦水氮利用及产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2013(4):48-53.
- [45] 董志强,吕丽华,姚艳荣,等.水氮互作下强筋小麦师栾02-1产量和品质[J].作物学报,2023,49(7):1942-1953.
- [46] BOGARD M, ALLARD V, BRANCOURT-HULMEL M, et al. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(15):4303-4312.

(责任编辑:黄克玲)