

黄淮南部平原喷灌冬小麦灌浆特性及水氮优化耦合研究

刘 见^{1,2}, 宁东峰¹, 秦安振¹, 张寄阳¹, 刘战东¹,
孙 彬², 丁鹏飞², 李 飞², 沈红丽², 赵东生²

(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,
河南 新乡 453002; 2.许昌市农田水利技术试验推广站, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了优化冬小麦水氮配置, 实现养分水分资源高效利用, 试验设计 3 个灌水水平(低灌水 W1: 25 mm; 中灌水 W2: 40 mm; 高灌水 W3: 55 mm)和 5 个氮肥水平(N0: 0; N1: 80 kg/hm²; N2: 180 kg/hm²; N3: 240 kg/hm²; N4: 300 kg/hm²), 共计 15 个处理, 探究了喷灌条件下灌水、施氮及其互作对籽粒灌浆特性及水氮利用效率的影响, 并通过建模求解最优水氮配置。结果表明: 施氮对 t_e (灌浆持续时间) 和 t_m (最大灌浆速率出现时间) 影响显著, 两者均随施氮量的增加表现为先增加后降低。N3 施氮水平下 t_e 和 t_m 最大, 均值分别为 43.9、24.6 天, 比 N0 (不施氮) 分别增加 1.7、3.0 天。W2N3 处理的 t_m 值最大, 比最小处理 W1N0 延后 5.0 天。 GF_{max} (最大灌浆速率) 与 AG (平均灌浆速率) 呈极显著相关 ($r=0.841^{**}$), 千粒重与产量 ($r=0.791^{**}$), t_e ($r=0.755^{**}$) 和 t_m ($r=0.717^{**}$) 呈极显著正相关。W2N3 组合产量和 WUE (水分利用效率) 均为最大, 分别为 8 960 kg/hm² 和 2.83 kg/m³。水氮耦合通过优化灌浆过程可有效提高冬小麦产量。喷灌灌水定额 26~35 mm、施氮量 193~204 kg/hm² (基施 40%+拔节期追施 60%) 的水氮资源配置模式可实现节水增产双效目标。

关键词: 水氮耦合; 喷灌; 灌浆特性; 水氮利用效率; 黄淮平原

中图分类号: S513; S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0244-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.035

Study on the Grain Filling Characteristics and Optimal Water and Nitrogen Coupling of Sprinkler-irrigated Winter Wheat in the Southern Regions of Huang Huai Plain

LIU Jian^{1,2}, NING Dongfeng¹, QIN Anzhen¹, ZHANG Jiyang¹, LIU Zhandong¹,
SUN Bin², DING Pengfei², LI Fei², SHEN Hongli², ZHAO Dongsheng²

(1. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002;
2. Xuchang Experiment and Extension Station of Farmland Water Conservancy, Xuchang, Henan 461000)

Abstract: This study was aimed to explore the optimal water and nitrogen allocation of winter wheat and achieve the efficient utilization of nutrient and water resources. Three irrigation supply levels (low, 25 mm, W1; moderate, 40 mm, W2; high, 55 mm, W3) and five nitrogen supply levels (N0, 0 kg/hm²; N1, 80 kg/hm²; N2, 180 kg/hm²; N3, 240 kg/hm²; N4, 300 kg/hm²) were designed to optimize the crop irrigation and fertilization. There were 15 treatments in total. The effects of irrigation, nitrogen application and their interaction on the grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency were explored, meanwhile, optimal water and nitrogen supply rates were solved by modeling. The results showed that t_e (grain-filling lasting time) and t_m (the time when maximum filling rate occurred) were affected by fertilization significantly, both of which increased first and then decreased as nitrogen application rates increased. t_e and t_m at N3 level were the largest, with an average of 43.9 and 24.6 days, which were 1.7 and 3.0 days longer than that of N0. The largest t_m value was obtained at W2N3 treatment, which happened 5.0 days later than W1N0 did. GF_{max} (maximum grain filling rate) and AG (average grain filling rate) exerted extremely significant correlation ($r=0.841^{**}$), 1000-kernel weight was extremely positive correlated with yield ($r=$

收稿日期: 2020-07-27

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301102); 公益性行业科研专项(201503130); 国家现代农业产业技术体系建设专项(nycyt-x-02)

第一作者: 刘见(1991—), 男, 硕士, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: liujiancaas@163.com

通信作者: 张寄阳(1973—), 男, 研究员, 主要从事非充分灌溉理论与技术研究。E-mail: firizjy@163.com

0.791^{**}), t_e ($r=0.755^{**}$) and t_m ($r=0.717^{**}$). The highest grain yield and water use efficiency were obtained at W2N3 treatment with the maximum of 8 960 kg/hm² and 2.83 kg/m³. Water and nitrogen coupling efficiently improved yield of winter wheat by optimizing grain filling process. Optimal irrigation quota of sprinkler was 26~35 mm, nitrogen application rate was 193~204 kg/hm² (basal application 40% and topdressing 60% at jointing stage) achieved the goals of water-saving and yield-increasing.

Keywords: water and nitrogen coupling; sprinkler; grain filling characteristics; water and nitrogen use efficiency; Huang Huai plain

水、肥是农业生产中投入的主要资源,也是农田生态系统中人为调控最为密集、重视度最高的限制因子^[1]。已有研究^[2-3]证实,水分与肥料互作效应明显。适量施肥可有效调节土壤水分利用过程,提高水分利用效率。水分是养分运输的介质,水分适宜可促进肥料向作物根部迁移和转化,提高肥料利用率,水分亏缺则限制作物对肥料的吸收^[4-5]。利用水肥协同效应提高农田水氮利用效率,在维持高产或微量减产的前提下大幅度减少农业灌溉用水和施氮量,对缓解地区水资源危机、保障粮食及生态安全具有重要意义。目前,国内外关于水氮互作对冬小麦影响的研究已相当深入,水氮互作显著影响冬小麦生长动态,生物量和叶面积随施氮量的增加先增加后降低,过多的水氮投入会造成作物减产,符合报酬递减率^[6],根重密度与耗水量、氮素利用率均呈显著正相关,发达的根系有利于产量和氮素利用率的提高,但较大的根系同时造成耗水量增加^[7]。适量施氮可显著提高叶片光合速率,部分弥补因干旱导致的光合速率降低的损失,并能提高作物干旱适应性^[8-9]。Xu 等^[10]和 Duan 等^[11]研究表明,适宜的灌溉和施肥,提高水氮利用效率,减少 N₂O 排放和避免深层地下水受硝酸盐污染。还有学者^[12]认为,土壤微生物和酶活性与小麦产量显著相关,中水中氮处理显著改善了黄淮平原土壤微生物特性和土壤肥力。综上发现,水氮耦合效应研究范围广,程度深,但是目前关于水氮耦合下冬小麦籽粒灌浆机理与产量形成关系的研究报道较少。另外,水氮耦合效应的研究多集中在地面灌或滴灌,现实农业生产中劳动力成本逐年增加,土地集约趋势愈发明显,以机械化、简约化、一体化管理为特征的喷灌技术正在粮食核心区建设中发挥关键作用,地理自动伸缩一体化喷灌技术具有节能省工、作物适应性强且不影响收割和田间耕作的特点,受到群众普遍欢迎,在黄淮地区具有良好的应用前景^[13]。然而,该高效节水喷灌技术模式下冬小麦水肥管理技术尚缺乏有效支撑,本研究基于推广应用效益较好的地理自动伸缩一体化喷灌,重点探讨冬小麦灌浆与产量形成机理,优化水氮资源配置,以期黄淮平原南部冬小麦增产增效提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在河南省许昌市高效节水灌溉示范区(113°59'E,34°09'N),面积 3.33 万 hm²。示范区地处黄淮平原中南部,属双泊河和黄河冲积平原,包括许昌市中部、许昌县东部和长葛市东部,平均海拔 79.6 m,属暖温带大陆性季风气候,雨热同期,多年平均气温 14.7℃,年平均日照时间 2 183 h,年平均降水量 698 mm,年平均蒸发量 1 044 mm。试验田供试土壤为潮土,质地为砂壤土,0—60 cm 土壤平均干容重为 1.43 g/cm³,田间持水量为 25%。示范区种植方式为冬小麦—夏玉米连作。为加快发展节水灌溉,提高水资源利用效率,夯实粮食稳产增产基础,示范区内建设有半固定式喷灌、智能化灌溉、小流量中心支轴喷灌、地理自动伸缩一体化喷灌、自驱动绞盘式喷灌和固定式喷灌等多种高效节水灌溉形式。土壤有机质含量 19.6 mg/kg,全氮含量 1.19 g/kg,全磷含量 1.67 g/kg,全钾含量 18.5 g/kg,碱解氮含量 15.11 mg/kg,速效磷含量 70.40 mg/kg,速效钾含量 106 mg/kg,pH 为 7.63,地下水埋深 20 m 以上。试验区 2018 年 10 月至 2019 年 6 月降雨量和气温均值见图 1。

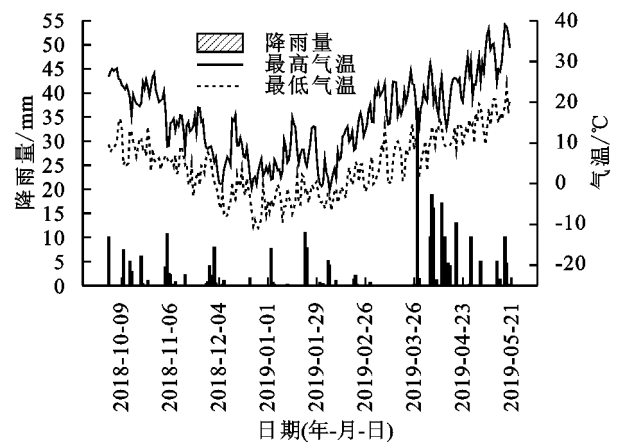


图 1 试验区降雨及气温动态变化

1.2 试验设计

试验选用灌水和氮肥二因子,采用裂区试验设计。主区为 3 个灌水水平,灌水定额分别为 25 mm (W1),40 mm (W2),55 mm (W3);裂区为 5 个氮肥处理,施氮量分别为 0 (N0),80 kg/hm² (N1),180 kg/hm² (N2),240 kg/hm² (N3),300 kg/hm² (N4),

均为纯施氮量。共计 15 个处理,重复 3 次。整个试验田块为 46 m×100 m,灌溉方式为地理式自动伸缩一体化喷灌,灌溉时在水压作用下冲出地面 70 cm,灌水结束后可收缩至地面 40 cm 以下,不影响耕作和收割,工作时喷灌压力 0.35 MPa,均匀系数 85%。根据 0—100 cm 土壤墒情监测并结合天气预报信息,W3 灌水处理下限设为 55% FC(田间持水率),达到灌水下限即开始灌水,W1 和 W2 处理灌水时间与 W3 相同。后期灌浆后不再灌溉,各处理灌水和施肥时间均保持一致。氮肥选用尿素(N 含量 46.7%),40%基施,60%拔节期追施。磷肥和钾肥用量均为 150 kg/hm²,分别选用过磷酸钙(P₂O₅ 含量 16%)和硫酸钾(K₂O 含量 50%),磷、钾肥全部基施。2018—2019 年属于平水年,4 月 17 日达到灌水下限进行灌溉时,受降雨影响,为保持灌水处理一致,实际灌水量为灌水定额的 1/2。3 次灌水当天,风速均小于 2 m/s,风速对喷灌均匀度的影响可忽略不计。整个生育期 W1、W2 和 W3 灌溉定额分别为 70.5,96.5,126.5 mm。试验供试小麦品种为“新麦 26”,于 2018 年 10 月 18 日播种,2019 年 6 月 3 日收获。各处理的灌水日期和灌水量见表 1。

表 1 不同灌水处理的灌水时间和灌水量

灌水 处理	灌水日期 (年-月-日)	实际 灌水量/mm	生育期 总灌水量/mm
W1	2018-12-12	25.4	70.5
	2019-03-28	30.0	
	2019-04-17	15.0	
W2	2018-12-12	35.8	96.5
	2019-03-28	40.4	
	2019-04-17	20.2	
W3	2018-12-12	50.2	126.5
	2019-03-28	50.8	
	2019-04-17	25.4	

1.3 指标测定与方法

试验站内安装有田间气象站,实时采集降水量、风速、风向、空气温度、湿度、日照时间和太阳辐射等气象数据信息。

冬小麦每个生育期,采用土钻钻取 0—100 cm 土层土壤,每层 20 cm,烘干测定土壤含水量。冬小麦花后每隔 7 天取 1 次植株麦穗,直至收获,观测小麦灌浆情况。各处理取样时间保持一致,为同一天上午 9:00—11:00,每次每个小区取 20 个麦穗,用剪刀从麦穗下端麦秆处剪断,确保麦穗完整并无籽粒脱落,实验室内采用电子天平称鲜重,杀青烘干方法与干物质处理相同,麦穗烘干后脱掉颖壳,称量籽粒干重,每个小区均为 3 次重复。利用公式(1)灌浆模型优化求

解不同水氮组合冬小麦灌浆特征参数^[14]。

$$G=G_{\max}(1+\frac{t_e-t}{t_e-t_m})(\frac{t}{t_e})^{\frac{t_e}{t_e-t_m}}, 0\leq t\leq t_e$$
 (1)

$$AG=G_{\max}/t_e$$
 (2)

$$GF_{\max}=G_{\max}\frac{2t_e-t_m}{t_e(t_e-t_m)}(\frac{t_m}{t_e})^{\frac{t_m}{t_e-t_m}}$$
 (3)

式中:G 为冬小麦花后 t 天的灌浆干重值(g);G_{max} 为冬小麦最大累积灌浆干重值(g),对应花后时间为 t_e。t_m 和 AG 分别为最大灌浆速率 GF_{max} 出现的时间(d)和生育期平均灌浆速率(g/d)。

冬小麦整个生育期田间管理措施与当地大田栽培一致,小麦成熟后,每个小区随机选取 3 个 1 m² 样地测产,折算总产量。另外,选择 2 个 1 m 行调查穗数、穗粒数和千粒重。

$$\text{土壤储水量 } W(\text{mm})=10\times\rho\times\theta\times h$$
 (4)

式中:h 为计划湿润层深度(cm);ρ 为土壤体积质量(g/cm³);θ 为土壤质量含水率(%)。

$$\text{生育期总耗水量 } ET(\text{mm})=I+P+U-D-R\pm\Delta W$$
 (5)

$$\text{水分利用效率 } WUE(\text{kg/m}^3)=Y/ET\times1000$$
 (6)

$$\text{氮肥农学利用效率 } NAE(\text{kg/kg})=(\text{施氮区作物产量}-\text{未施氮区作物产量})/\text{施氮量}$$
 (7)

式中:I 为灌溉量(mm);P 为田间有效降水量(mm),即生育期单次降雨量≥5 mm 的累积之和;U 为地下水补给量(mm);D 为深层渗漏量(mm);R 为径流量(mm);ΔW 为播种前后土壤贮水变化量(mm)。因试验区地势平坦,地下水埋藏较深,根据实测,生育期内 1 m 深土壤水分变化不大,且喷灌湿润程度较浅,U、D 和 R 均可忽略不计。Y 为籽粒实际产量(kg/m²)。

1.4 统计分析

利用 Excel 2010 进行数据处理,采用 SPSS 18.0 软件进行双因素方差分析,Duncan 法进行多重比较(α=0.05)。利用 Mathematics 11.3 软件进行回归分析及作图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对喷灌冬小麦灌浆特性的影响

由表 2 可知,施氮对 t_e(灌浆持续时间)和 t_m(最大灌浆速率出现的时间)的影响均达到显著水平。t_e 随施氮量的增加表现为先增加后降低,N3 施氮水平下最大,均值为 43.9 天,比最小值 N0(不施氮)处理灌浆延长 1.7 天,N1~N4 处理间无显著差异。与 t_e 变化规律相同,t_m 在 N3 和 N4 施氮水平达到最大值,其最大灌浆速率出现的时间比最小值 N0 延后 3.0 天,说明适宜的施氮量能够延长冬小麦灌浆持续时间和延后最大灌浆速率出现的时间。灌水和施氮及两者互作对 AG 和 GF_{max} 的影响均未达到显著水平。

但从具体统计数据可以看出,AG 和 $GF_{\max}$ 均随灌水量的增加而小幅度降低,说明适度的水分亏缺可以增加冬小麦的平均灌浆速率和最大灌浆速率,但差异不显著。AG 和 $GF_{\max}$ 随施氮量的增加先增加后降低,峰值出现在 N2 施肥水平,分别为 1.322,2.052 g/d。

表 2 水氮耦合对冬小麦灌浆特征参数的影响

因素	水平	t_e /d	t_m /d	AG/ (mg·d ⁻¹)	$GF_{\max}$ / (mg·d ⁻¹)
灌水	W1	42.7a	23.3a	1.297a	2.003a
	W2	43.1a	24.5a	1.255a	1.969a
	W3	43.0a	23.9a	1.238a	1.916a
施氮	N0	42.2b	21.6b	1.259a	1.902a
	N1	42.6ab	23.5ab	1.241a	1.937a
	N2	43.4a	24.4a	1.322a	2.052a
	N3	43.9a	24.6a	1.262a	1.976a
灌水×施氮	N4	42.9ab	24.6a	1.231a	1.951a
	灌水	0.950	0.447	0.171	0.234
	施氮	0.042*	0.035*	0.260	0.228
灌水×施氮		1.065	0.942	0.369	0.483

注:同列不同字母表示各水平间显著差异($P<0.05$);*表示各因素间差异显著($P<0.05$);**表示各因素间差异极显著($P<0.01$)。下同。

2.2 不同水氮处理下喷灌冬小麦产量及其构成要素

由表 3 可知,灌水对成穗数影响显著,W2 和 W3 灌水水平成穗数无显著差异,但两者分别与 W1 灌水差异显著,均值较 W1 分别增加 8.41%和 7.13%。穗粒数随施肥量的增加而增加,但 N3、N4 和 N5 处理间无差异。W3 灌水处理的穗粒数均值与 W2 没有差异,两者穗粒数比 W1 灌水处理分别增加 17.7%和 11.3%。施氮对千粒重影响极显著,N3 施肥水平千粒重均值为 53.6 g,比 N1、N0 分别增加 3.7%和 5.6%,W2N3 处理千粒重最大为 55.62 g。水氮对产量影响呈极显著,产量随施氮量的增加均表现为先增加后降低的趋势,W1、W2 和 W3 灌水水平分别在 N2、N3 和 N3 施氮量下达到最大值,其中,W2N3 处理产量最大为 8 960 kg/hm²,说明增加施氮量可补偿因水分不足导致的减产,但过量施氮该效应降低。同时,增加灌水量也能补偿因施氮不足导致的产量降低,灌水量过多则产量增加不明显。

2.3 水氮耦合下冬小麦产量、千粒重与灌浆特征参数的相关性分析

由相关性分析(表 4)可知, t_e (灌浆持续时间)和 t_m (最大灌浆速率出现时间)呈极显著正相关关系。 $GF_{\max}$ (最大灌浆速率)与 AG(平均灌浆速率)呈极显著相关($r=0.841^{**}$),千粒重与两者无明显相关关系;但是,千粒重与 t_e 和 t_m 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.753 和 0.717。冬小麦产量与 t_e ($r=0.656^{**}$)、 t_m ($r=0.752^{**}$)和千粒重($r=0.791^{**}$)呈极显著正相关,

与 AG 和 $GF_{\max}$ 则无明显相关关系。施氮可显著影响冬小麦灌浆持续时间和最大灌浆速率出现的时间,适宜的灌水量亦可增加冬小麦的平均灌浆速率和最大灌浆速率(表 2)。因此,通过水氮调控可有效优化灌浆过程,从而提高冬小麦产量。

表 3 不同灌水和施氮下冬小麦产量及其构成要素

灌水	施肥	穗数/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)
W1	N0	498.5ab	27.9e	50.68b	6594h
	N1	489.1abc	28.0e	50.71b	7440fg
	N2	424.6c	28.3de	53.34ab	8297abcde
	N3	531.5ab	31.4bcde	51.54b	7493efg
W2	N4	456.9bc	28.4de	52.02b	7692cdefg
	N0	513.9ab	29.1cde	50.66b	7567defg
	N1	542.4a	31.0cde	51.09b	8269abcdef
	N2	536.7a	32.7bc	52.98ab	8514abc
W3	N3	500.6ab	31.9bcde	55.62a	8960ab
	N4	508.8ab	35.5ab	51.68b	8165abcdf
	N0	518.8ab	29.7cde	50.95b	7329g
	N1	552.7a	31.4bcde	53.38ab	7830bcdefg
F 检验 (P 值)	N2	503.3ab	39.3a	52.93ab	8359abcd
	N3	511.2ab	33.2bcd	53.72ab	8612ab
	N4	485.8abc	35.9ab	52.58b	8256abcdef
	W	0.017*	0**	0.192	0**
W×N	N	0.112	0.004**	0.005**	0**
	W×N	0.178	0.078	0.196	0.382

表 4 不同水氮处理冬小麦产量、千粒重与灌浆特征参数相关分析

参数	t_e	t_m	AG	$GF_{\max}$	千粒重
t_m	0.668**				
AG	0.024	0.018			
$GF_{\max}$	0.220	0.491	0.841**		
千粒重	0.755**	0.717**	0.076	0.363	
产量	0.656**	0.752**	0.020	0.287	0.791**

2.4 水氮耦合对喷灌冬小麦水氮利用效率的影响

由表 5 可知,灌水极显著影响冬小麦耗水量,生育期总耗水量随灌水量的增加而增大。灌水和施氮对 WUE(水分利用效率)的影响均呈极显著水平。从不同水氮组合看,W2N3 的 WUE 最大,为 2.83 kg/m³。3 个灌水水平间 WUE 差异显著,W2 灌水处理的 WUE 均值为 2.54 kg/m³,显著大于 W1 和 W3 处理。N1、N2、N3 和 N4 施氮处理间 WUE 均值无显著差异,但明显高于 N0,其中,N3 施氮水平 WUE 均值最大,为 2.59 kg/m³。因此,适宜提高施氮量可增加冬小麦的 WUE。施氮显著影响冬小麦 NAE(氮肥农学利用效率),施氮量增加,NAE 降低(W2N3 除外),说明过多的施氮不仅不会增加产量(表 3),氮素的利用效率反而大幅度降低,氮肥资源浪费严重。

表 5 不同灌水和施氮组合下冬小麦水氮利用效率				
灌水	施肥	总耗 水量/mm	WUE/ (kg·m ⁻³)	NAE/ (kg·kg ⁻¹)
W1	N0	306.38c	2.15ef	—
	N1	297.14d	2.50cd	10.58a
	N2	300.66cd	2.76ab	9.46ab
	N3	304.58cd	2.46cd	3.75cd
	N4	307.44c	2.50bcd	3.66cd
W2	N0	336.30b	2.25def	—
	N1	321.94b	2.57bc	8.78abc
	N2	331.52b	2.58bc	5.26bcd
	N3	316.94bc	2.83a	5.80bcd
	N4	326.46b	2.50bcd	1.99e
W3	N0	351.35a	2.09f	—
	N1	344.48ab	2.27def	6.26bc
	N2	355.11a	2.35cde	5.72bcd
	N3	347.48a	2.48cd	5.35bcd
	N4	352.82a	2.34cde	3.09d
F 检验	W	0.048 *	0 **	0.159
	N	0.093	0 **	0.002 **
(P 值)	W×N	0.162	0.083	0.203

2.5 基于冬小麦产量和水氮利用效率的管理优化方案

水氮供应与冬小麦产量、水分利用效率及氮肥农学利用效率的回归关系见表 6。由回归方程可知,当产量达到最大值 8 787 kg/hm² 时,喷灌水量为 106

表 6 水氮耦合与冬小麦产量、水分利用效率和氮肥农学利用效率的非线性回归方程

因变量	回归方程	R ²	z 取得最大值时对应的 x 和 y 组合		
			x/mm	y/(kg·hm ⁻²)	z _{max}
产量	$Z_{\text{产量}}=775.884+128.16554x-0.63944x^2+11.80165y+0.03666xy-0.03819y^2$	0.997 **	106	205	8787
水分利用效率	$Z_{\text{水分利用效率}}=1.013+0.0317543x-0.000192811x^2+0.00292793y+0.00001373xy-0.00001107y^2$	0.996 **	89.0	187.4	2.7
氮肥农学利用效率	$Z_{\text{氮肥农学利用效率}}=24.03080-0.19095x+0.0004x^2-0.04621y+0.0004xy-0.00005y^2$	0.796 **	50	50	14.1

注:x 和 y 分别为冬小麦生育期灌水(mm)及施氮总量(kg/hm²)。

3 讨论

3.1 水氮耦合对喷灌冬小麦籽粒灌浆特性的影响

冬小麦籽粒灌浆过程受小麦品种特性、降雨、温度和灌溉施肥的影响^[15-17],对产量形成至关重要。Yan 等^[18]研究认为,小麦最大灌浆速率出现的时间(t_m)和灌浆持续时间(t_e)随施肥量的增加而增加。本研究结果也认为,施氮对 t_e 和 t_m 影响显著,但两者随施氮量的增加表现为先增加后降低。结论之所以不同,可能与灌水方式和施肥梯度范围设置不同有关,前者为水肥一体化滴灌,本试验为喷灌灌溉;前者施肥梯度范围设置在取得目标最大值时自变量之前,而本试验目标最大值正好落在试验设计的水肥区间内。有学者^[19]研究指出,氮肥后移运筹方式显著提高冬小麦籽粒平均灌浆速率,最大灌浆速率($GF_{\max}$)和平均灌浆速率(AG)随施氮量的增加先增加,然后略有下降^[18]。滴灌量增加,灌浆持续时间延长,冬小麦平均灌浆速率减小^[20]。本研究中,灌水和施氮及两者互作对 AG 和

mm,施氮量为 205 kg/hm²;当 WUE 达到最大值 2.70 kg/m³,喷灌水量为 89.0 mm,施氮量为 187.4 kg/hm²;当 NAE 达到最大值 14.07 时,喷灌水量为 50 mm,施氮量为 50 kg/hm²。可见,同一灌水量和施氮量时,3 项统计指标无法同时达到最优值,因此考虑将指标范围扩大至最大值的 95%置信区间,寻找三者的重叠区域。从图 2 可以看出,产量和 WUE 随自变量的变化呈先增大后减小的趋势,两者有交叉区域,而 NAE 则表现出相反的变化规律,其 65%的置信区间与前两者无明显重叠部分,综合考虑节水及高产,以产量及 WUE 的 95%置信区间为依据,计算兼顾产量及水分利用效率的最优区间。95%产量区间对应的灌水及施氮量分别为 80~133 mm 和 193~218 kg/hm²,95%WUE 区间对应的灌水及施氮量分别为 62~116 mm 和 171~204 kg/hm²。当喷灌灌水量为 80~116 mm,施氮量为 193~204 kg/hm² 时,产量及 WUE 均分布在最大值的 95%置信区间内;进一步分析知,当灌水量超过 106 mm 时,产量反而下降,即多灌水量并没有起到提高产量的作用。因此,在本试验条件下,兼顾绿色高产高效,冬小麦生育期喷灌灌溉定额为 80~106 mm(灌水定额 26~35 mm),施氮量为 193~204 kg/hm² 的水肥管理方案可作为黄淮中南部平原灌区适宜推荐田间水肥管理模式。

$GF_{\max}$ 影响均未达到统计学意义,但从数据对比可以看出,适度的水分亏缺在一定程度上能够增加冬小麦的 AG 和 $GF_{\max}$,与孟兆江等^[21]关于轻度调亏具有较高的灌浆速率和平均灌浆速率的结论较为一致。

与地面灌相比,喷灌可提高冬小麦生育期的平均灌浆速率和最大灌浆速率^[22]。已有研究^[23-25]表明,冬小麦粒重由籽粒灌浆速率和灌浆持续时间决定。受施氮灌溉方式和肥料种类的影响,有学者^[26-27]关于千粒重与冬小麦 AG 和 $GF_{\max}$ 相关性的研究结论差异较大,千粒重与 $GF_{\max}$ 呈正相关,与 AG 相关性不显著;也有研究^[28-29]认为,千粒重与 AG 呈显著相关。本研究中,施氮对千粒重呈极显著影响,但是千粒重与 AG 和 $GF_{\max}$ 无明显相关关系,可能是因为灌水和施氮两因素对 AG 和 $GF_{\max}$ 的影响未达到显著水平,导致不同处理间 AG 和 $GF_{\max}$ 差异不显著,从而与千粒重关系不显著。另有研究^[30]表明,粒重与籽粒灌浆持续时间呈正相关。郭天财等^[31]研究则认为,籽

粒灌浆速率与粒重呈显著正相关,而灌浆持续时间与粒重形成无显著相关。本试验发现,千粒重与 t_e (灌浆持续时间)和 t_m (最大灌浆速率出现时间)呈极显著相关关系,主要是因为施氮显著影响 t_e 和 t_m ,增加冬小麦灌浆累积时间,优化粒重形成过程。因此,通过对冬小麦进行水氮调控,可以有效优化籽粒灌浆,进而提高作物产量。

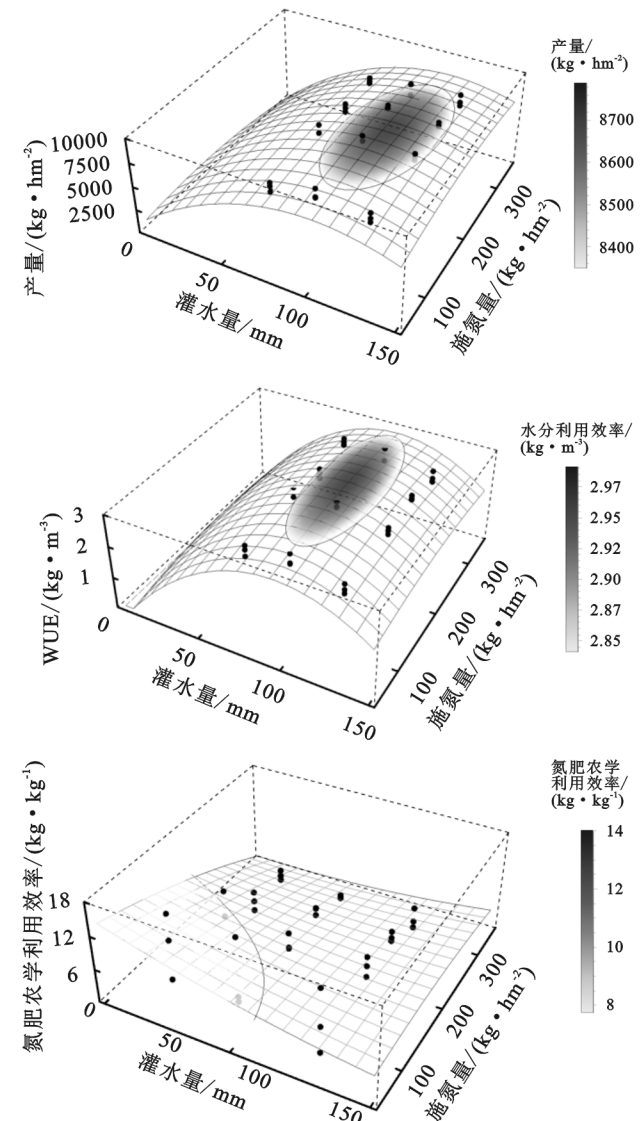


图 2 冬小麦水氮组合与产量、WUE 和氮肥农学利用效率的关系

3.2 喷灌施肥下冬小麦水氮利用效率及优化耦合

水氮互作显著影响冬小麦耗水特性,干旱胁迫初期可通过施氮来提高土壤贮水的利用率,施氮过多对灌水的补偿效应较小^[32],施氮处理的剖面土壤水分消耗显著增加,导致耗水量增大^[33]。本试验中施氮对生育期总耗水量影响不显著,可能是因为试验地块土壤较为肥沃,氮的主效应较弱,处理间差异不显著。关于水氮耦合的增产效应,姜小凤等^[34]研究认为,正常水分条件下,增加氮肥用量有利于提高春小麦的经济产量,水分胁迫则减少氮肥用量,更有利于小麦的

增产^[34]。雒文鹤等^[35]研究指出,在关中平原施氮量 150 kg/hm² 配合越冬期灌水 600 m³/hm²,能够在保障产量的基础上,提高水氮利用效率。Si 等^[36]在黄淮平原滴灌施肥试验中得出,增加灌水量和施氮量显著提高冬小麦产量和水分利用效率,施氮量超过 240 kg/hm² 对小麦产量、水分利用效率和灌溉水利用效率均不利。Cui 等^[37]在全国粮食生产区域基础上试验研究认为,减氮增产并不矛盾,氮肥施用量减少 14.7%~18.1% 的情况下,粮食平均产量增加 10.8%~11.5%。本试验中,产量随施氮量的增加表现为先增加后减少,符合报酬递减规律。中灌水处理 W2 与 N2~N3 施氮水平耦合最佳,在此水氮资源配置下,产量为 8 514~8 960 kg/hm²,水分利用效率为 2.58~2.83 kg/m³,增加施氮或灌水量均可弥补因两者中其一不足而导致的减产,但过量增加施氮和灌水,该弥补效应降低。因此,在农业实际生产中,注重水氮资源调配,对提高冬小麦水氮资源利用,实现“以肥调水、以水促肥”至关重要。

经实地调查,同样的栽培和田间管理,当年当地冬小麦平均灌水量为 120 mm,施氮量为 260 kg/hm²,产量为 7 875 kg/hm²,应用该技术模式后,可节水 11.67%~33.33%,节氮 21.54%~25.77%,增产 5.83%~11.55%,实现农业生产绿色高效。本试验区 2018—2019 年属于平水年,基于冬小麦产量及水氮利用效率最大值的 95% 置信区间优化水氮管理策略,黄淮平原南部冬小麦生育期,喷灌灌水定额 26~35 mm,施氮量 193~204 kg/hm² 的水肥管理方案能够实现节水减氮增产的目标。

本研究结果是基于 1 年的冬小麦大田试验得出的适宜水氮优化模式,可用于指导黄淮中南部灌区喷灌冬小麦田间水肥管理,但由于降雨年型不同,更精确的水氮配置还需进一步的多年多点试验验证。此外,本试验根据相关性建立了二元二次的水氮产量模型,但是受气候、土壤类型、灌排方式、作物种类等空间变异性的影响,有必要建立不同区域和环境下的通用模型,以用来模拟田间生产,预报自然灾害。

参考文献:

[1] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社,2003.
[2] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):301-308.
[3] 魏廷邦,柴强,王伟民,等.水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J].中国农业科学,2019,52(3):428-444.
[4] 刘卫星.不同水氮运筹对冬小麦根系生长及氮素利用调控的研究[D].郑州:河南农业大学,2018.
[5] 宁东峰,秦安振,刘战东,等.滴灌施肥下水氮供应对夏玉米产量、硝态氮和水氮利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(9):28-35.
[6] 付秋萍.黄土高原冬小麦水氮高效利用及优化耦合研究[D].北京:中国科学院研究生院,2013.

- [7] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.水氮互作对冬小麦氮素吸收分配及土壤硝态氮积累的影响[J].水土保持学报[J].2013,27(3):138-142,149.
- [8] Cossani C M, Sadras V O. Increasing colimitation of water and nitrogen drives genetic yield gain in Australian wheat [J]. European Journal of Agronomy,2019,106:23-29.
- [9] 于显枫,郭天文,张仁陟,等.水氮互作对春小麦叶片气体交换和叶绿素荧光参数的作用机制[J].西北农业学报,2008,17(3):117-123.
- [10] Xu J T, Wang X Y, Ding Y B, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization management on crop yields and long-term dynamic characteristics of water and nitrogen transport at deep soil depths [J]. Soil and Tillage Research,2020,198:104536.
- [11] Duan J Z, Shao Y H, Li H, 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.
- [12] Zhou S M, Zhang M, Zhang K K, et al. Effects of reduced nitrogen and suitable soil moisture on wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere soil microbiological, biochemical properties and yield in the Huanghuai Plain China [J]. Journal of Integrative Agriculture,2020,19(1):234-250.
- [13] 刘见,张寄阳,宁东峰,等.黄淮井灌区冬小麦—夏玉米连作喷灌模式综合评价与优选研究[J].节水灌溉,2019(11):71-76.
- [14] Yin X Y, Goudriaan J, Lantinga E A, et al. A flexible sigmoid function of determinate growth [J]. Annals of Botany,2003,91(3):361-371.
- [15] Thapa S, Jessup K E, Pradhan G P, et al. Canopy temperature depression at grain filling correlates to winter wheat yield in the U.S. Southern High Plains [J]. Field Crops Research,2018,217:11-19.
- [16] Yadav G, Ellis R H. Effects of rain shelter or simulated rain during grain filling and maturation on subsequent wheat grain quality in the UK [J]. The Journal of Agricultural Science,2017,155(2):300-316.
- [17] 臧贺藏,张英华,张兴娟,等.水氮限量供给下高产小麦品种籽粒灌浆特性及氮磷钾积累动态[J].草业学报,2016,25(9):28-36.
- [18] Yan S C, Wu Y, Fan J L, et al. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat [J]. Agricultural Water Management,2019,213:983-995.
- [19] 武文明,陈洪俭,李金才,等.氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响[J].作物学报,2012,38(6):1088-1096.
- [20] 张娜,张永强,仵妮平,等.滴灌量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响研究[J].水土保持研究,2015,22(5):271-275.
- [21] 孟兆江,孙景生,段爱旺,等.调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型[J].农业工程学报,2010,26(1):18-23.
- [22] 姚素梅,康跃虎,吕国华,等.喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析[J].农业工程学报,2011,27(7):13-17.
- [23] Kamaluddin, Rishi M S, Malik Z A, et al. Inheritance of grain filling duration in spring wheat (*Triticum aestivum* L. em thell) [J]. Journal of Plant Biology,2007,50:504-507.
- [24] 刘培,蔡焕杰,王健.土壤水分胁迫下冬小麦籽粒灌浆特性的研究[J].节水灌溉,2010(1):1-4.
- [25] 张黛静,杨逗逗,马建辉,等.测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(1):47-55.
- [26] 杨金宇,李援农,王凯瑜,等.控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):442-452.
- [27] 王美,赵广才,石书兵,等.施氮及控水对黑粒小麦旗叶光合特性及籽粒灌浆的影响[J].核农学报,2017,31(1):179-186.
- [28] 李朝苏,汤永禄,吴春,等.施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):873-883.
- [29] 宫宇,郭艳艳,王贵彦,等.追氮时期对冬小麦胚乳发育及灌浆特性的影响[J].麦类作物学报,2019,39(4):472-477.
- [30] 吴少辉,高海涛,张学品,等.播期对不同习性小麦品种籽粒灌浆特性的影响[J].麦类作物学报,2004,24(4):107-109.
- [31] 郭天财,岳艳军,马冬云,等.追氮时期对冬小麦籽粒灌浆及淀粉特性的影响[J].麦类作物学报,2007,27(5):836-840.
- [32] 黄玲,杨文平,胡喜巧,等.水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):168-174.
- [33] Rudnick D R, Irmak S, Djaman K, et al. Impact of irrigation and nitrogen fertilizer rate on soil water trends and maize evapotranspiration during the vegetative and reproductive periods [J]. Agricultural Water Management,2017,191:77-84.
- [34] 姜小凤,郭建国,董博,等.水氮互作对旱地春小麦氮肥利用效率和经济产量的影响[J].麦类作物学报,2018,38(9):1105-1111.
- [35] 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.
- [36] Si Z Y, Muhammad Z, Faisal M, et al. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management,2020,231: 106002.
- [37] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers [J]. Nature,2018,555(7696):363-366.