

不同氮肥条件下补充灌溉对冬小麦生长、 产量和 WUE 的影响

呼红伟^{1,2,3}, 蔡焕杰^{1,2,3*}, 王鑫宇^{1,2,3}, 孙亚楠^{1,2,3}, 王云霏^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 【目的】促进农业用水施肥增效, 初步探索出适宜于陕西关中地区干旱年冬小麦高产的合理水肥区间。

【方法】设置灌水次数和施氮量 2 个因素, 灌水次数分别为全生育期不灌水 (I0)、拔节期灌 1 次 (I1)、抽穗期灌 1 次 (I2)、拔节期和抽穗期各灌 1 次 (I3), 拔节期、抽穗期和成熟期各灌 1 次 (I4), 施氮量设置为 75 kg/hm² (F1)、150 kg/hm² (F2)、300 kg/hm² (F3), 研究了冬小麦生长指标、产量和水分利用效率。【结果】①随着灌水量的增加而增加, 旱作雨养种植增加了作物对土壤储水量的吸收利用, 在收获后腾出了相应的土壤水分库容。土壤水分的消耗量随施氮量的增加而略有增加。②在同一水分处理下, 冬小麦地上部干物质量各生育期均呈高肥>中肥>低肥, 增施氮肥能够显著增加地上部干物质量, 同一氮肥水平处理下, 各生育期的干物质量均随灌水量的增加而增加, 且补灌拔节水对增加干物质量有着显著正效应。③灌水对产量有着极显著影响, 对水分利用效率无显著性影响; 施肥对产量无显著影响, 与水分利用效率有着极显著的正相关关系。F1I0 处理产量最低 3 728.00 kg/hm², F3I4 处理产量最大 5 905.90 kg/hm², 高出 F1I0 处理 58.42%。F2I1 处理 WUE 为 1.88 kg/m³, 产量为 5 377.1 kg/hm², 比 F1I0 处理 WUE 高出 48.77%, 比 F1I0 处理产量高出 44.24%。【结论】在干旱年条件下, 施氮量 150 kg/hm² 和在拔节期补灌 1 次 (F2I1) 为陕西关中地区较为适宜的高效水肥管理措施。

关键词: 灌溉; 产量; 水分利用效率; 生物量; 冬小麦

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019342

呼红伟, 蔡焕杰, 王鑫宇, 等. 不同氮肥条件下补充灌溉对冬小麦生长、产量和 WUE 的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 51-59.

HU Hongwei, CAI Huanjie, WANG Xingyu, et al. Effects of Supplementary Irrigation on Biomass, WUE and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Fertilizer Conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 51-59.

0 引言

小麦作为我国三大粮食作物之一^[1], 冬小麦在我国的种植面积和总产量占到全国粮食作物的 20%~30%^[2]。陕西关中地区冬小麦生育期约为每年 10 月中旬至次年 6 月初, 而该地区秋季多雨, 春季干旱, 其生育期降水与作物需水期存在严重时序上错位, 加上西北地区水资源本身严重紧缺, 近年来由于干旱缺水造成的冬小麦减产已经超过其他自然灾害造成的作物减产的总和^[3-4]。

作物的生长状况离不开肥料、养分的补给, 增施肥料也是提高作物产量的重要措施之一^[5], 尤其是氮肥, 作物对氮素的吸收和转化对产量的形成至关重要, 合理高效的施肥措施是一个地区农业现代化的重要标志之一^[6,17,19]。据研究报道, 中国冬小麦、夏玉米大致的施氮量区间为 150~250 kg/hm²。陕西关中地区农业产量占全省农业总产量的 2/3 以上, 在全省的社会经济发展中起着举足轻重的作用^[7]。为达到作物高产, 目前陕西关中地区仍旧存在一些大量施用氮肥的现象, 使得作物的水分利用效率和氮肥利用效率大大降低, 也会对当地土壤质地造成严重破坏^[21,27-29]。为了缓解水资源匮乏以及大量施用氮肥和作物产量之间的尖锐矛盾, 必须进行在灌溉和施肥条件对作物产量和水氮利用效率的影响研究。【研究进展】至今有很多科学家研究了水氮耦合与小麦干物质积累、产

收稿日期: 2019-10-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400200); 国家自然科学基金项目 (51879223)

作者简介: 呼红伟 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉新技术。E-mail: hhw1115@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 蔡焕杰 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农业节水与水资源高效利用。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

量间关系^[20,26,34]。李正鹏等^[9]认为灌水主要是通过提高叶面积指数的扩展速率来增大叶面积指数,通过延长株高的生长时间来增大株高,从而提高作物产量;姚宁等^[4]研究表明,不同生育期时段受旱对冬小麦物候期有较大影响,且灌水量和受旱时段有着显著交互作用,不同生育期水分亏缺是影响作物产量的主要因素。Sharma等^[31]研究得到在干旱年中增加灌水次数能够显著提高小麦产量;Hsiao^[32]研究表明,在水分亏缺状态下,增加土壤水分利用效率能显著提高冬小麦产量;Saeidi等^[33]研究表明灌浆期作物受旱后,籽粒产量和千粒质量均严重降低,同时籽粒灌浆后的同化物也相应减少。这些大量研究为冬小麦的稳定增产和水分利用效率的提高提供了科学依据和理论基础,也得到了在水氮耦合下作物增产节水的作用机理和效率以及冬小麦可以得到最大产量的水分和氮肥施用条件。

【切入点】虽然目前在冬小麦水氮耦合方面已有大量研究,但在不同氮肥处理下进行补充灌溉研究较少,本研究从不同氮肥水平和不同灌水次数的耦合着手,

【拟解决的关键问题】研究得出一种施氮量和补充灌溉次数耦合效应下的最佳水肥管理措施,【研究意义】以期对陕西关中地区冬小麦增产节水减氮提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

采用“小偃 22 号”作为供试品种,该品种为弱春性,中熟。幼苗半匍匐,分蘖能力较强,叶色浅,叶片较长,株型较为紧凑,抗倒伏能力一般。穗呈纺锤形,短芒、白壳、白粒,籽粒角质、码密,结实性较好,成穗率较高。

1.2 研究区概况

试验于 2017—2018 年在西北农林科技大学节水灌溉试验站(108°05'E, 34°24'N, 海拔 521 m)内进行,该地区的土壤质地为粉砂质黏壤土,俗称壤土,试验前 0~20 cm 耕作层土壤有机质量为 11.17 g/kg、全氮量为 0.95 g/kg、速效磷量为 13.67 mg/kg 和速效钾量为 183.20 mg/kg,硝态氮量为 23.10 mg/kg。1 m 土层的平均田间持水率为 21%~23%,凋萎系数为 8.5% (均以质量含水率计算)。

1.3 试验设计

本试验采用二因素完全随机区组设计,试验因素为水分和氮肥,每个处理设置 3 个重复,灌水方式为畦灌,用灌水次数控制土壤水分,分别为: I0 (全生育期不灌水)、I1 (只灌拔节水)、I2 (只灌抽穗水)、I3 (在拔节期和抽穗期灌水)、I4 (在拔节期、抽穗期和成熟期灌水),灌水量用水表控制,

施氮量设计为: 低肥施纯氮 75 kg/hm² (F1), 中肥设置施纯氮 150 kg/hm² (F2), 高肥施纯氮 300 kg/hm² (F3), 具体处理见表 1。氮肥和磷肥品种为尿素(N 46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%), 各处理均施五氧化二磷(P₂O₅) 110 kg/hm², 氮肥和磷肥均作为基肥在耕地前一次性施入。试验小区宽 3.7 m, 长 3.75 m, 面积为 13.875 m², 每个试验小区之间均有 1 m 的作物保护行, 以减免相邻小区之间的相互影响。试验于 2017 年 10 月 20 日种植, 采用机械播种, 播种量为 225 kg/hm², 在冬小麦生育生长阶段及时控制杂草和病虫害, 其他管理措施与当地农民栽培习惯相同, 小麦于 2018 年 6 月 4 日收获。灌水处理采用需要补充水量 75 mm~前后 2 次灌水之间的降雨量, 2018 年 3 月 22 日之前降雨量共 42.9 mm, 拔节期灌水 32.1 mm, 2018 年 3 月 22 日—4 月 18 日降雨量共 52.3 mm, 抽穗期灌水共 22.7 mm, 2018 年 4 月 18—5 月 16 日降雨量共计 47.5 mm, 成熟期灌水 27.5 mm。全生育期降雨情况和气温度比如图 1 所示。

表 1 不同氮肥处理下的补充灌溉量

Table 1 The amount of supplementary irrigation under different nitrogen fertilizer treatment

处理 Treatments		灌水量/mm Irrigation volume		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturing
I0	F1	0	0	0
	F2	0	0	0
	F3	0	0	0
I1	F1	32.1	0	0
	F2	32.1	0	0
	F3	32.1	0	0
I2	F1	0	22.7	0
	F2	0	22.7	0
	F3	0	22.7	0
I3	F1	32.1	22.7	0
	F2	32.1	22.7	0
	F3	32.1	22.7	0
I4	F1	32.1	22.7	27.5
	F2	32.1	22.7	27.5
	F3	32.1	22.7	27.5

1.4 取样及测试方法

冬小麦的叶面积指数采用冠层分析仪测量。每个生育期测量 1 次, 灌水后加测 1 次。

冬小麦全生育期的土壤水分状况均采用直径 5 cm 土钻取土, 20 cm 为 1 层, 测定 1 m 土层的土壤含水量, 用烘干法测量, 测定时间是在每个生育期以及降雨后、灌水前后均加测。

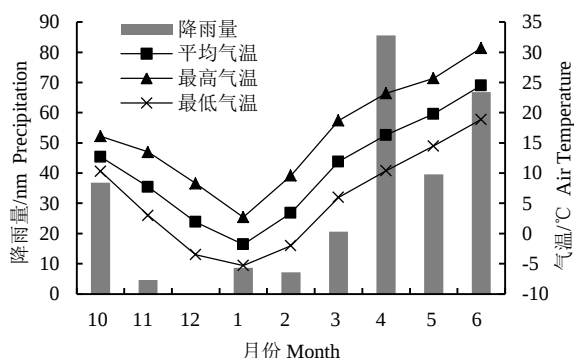


图1 冬小麦全生育期降雨量和温度

Fig.1 Rainfall and temperature during the whole growth period of winter wheat

在冬小麦收获期每个小区收割 1 m^2 的冬小麦，测定 1 m^2 穗数、千粒质量、产量。

冬小麦全生育期实际耗水量采用水量平衡公式计算：

$$ET_a = P_r + I + \Delta W - R - D + K, \quad (1)$$

式中： ET_a 为作物耗水量 (mm)； P_r 为冬小麦全生育期降雨量 (mm)； I 为灌水量 (mm)； ΔW 为播种与收获时 1 m 土层土壤贮水量之差 (mm)； R 为地表径流 (mm)，试验中无地表径流，故 R 不计； D 为土壤深层渗漏量 (mm)； K 为地下水补给量 (mm)。本试验区地下水埋深约 50 m ，故 K 可忽略不计。

冬小麦的水分利用效率是根据产量和作物实际耗水量，计算式为：

$$WUE = Y / (10ET_a), \quad (2)$$

式中： WUE 为冬小麦水分利用效率 (kg/m^3)； Y 为冬小麦籽粒产量 (kg/hm^2)； ET_a 为作物全生育期耗水量 (mm)。

1.5 数据处理分析

采用 Excel 2007 试验数据处理和画图，利用 SPSS 20.0 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对冬小麦耗水量的影响

2017—2018 年冬小麦全生育期中不同水氮处理下对作物耗水量的影响如表 2 所示。在相同氮肥施用量下，随着灌水量的增加作物耗水量显著增加，在低肥条件下，作物耗水量排序为：I4 处理>I3 处理>I2 处理>I1 处理>I0 处理；中肥条件下作物耗水量排序为：I4 处理>I3 处理>I2 处理>I0 处理>I1 处理；高肥条件下作物耗水量排序为：I4 处理>I3 处理>I1 处理>I2 处理>I0 处理。与雨养条件比较，灌水处理下的冬小麦耗水量明显增加，不同氮肥条件下灌水处理高出雨养条件 1.03%~18.50%、1.76%~25.60%、

5.70%~25.74%。旱作雨养种植增加了作物对土壤储水量的吸收利用，在收获后腾出了相应的土壤水分库容，在 F3I0 处理下腾出一个最大土壤水分库容 128.84 mm ，在 F1I4 处理下最小土壤水分库容为 75.09 mm 。

表 2 不同水氮处理下冬小麦全生育期耗水量

Table 2 Water consumption of winter wheat under different irrigation and nitrogen treatments mm

处理 Treatments	I	P_r	土壤储水量 消耗量 SWS	ET_a
F1I0	0	176.02	118.82ab±8.53	294.84g±8.53
F1I1	32.1	176.02	89.76def±7.12	297.88g±7.12
F1I2	22.7	176.02	102.18bcde±4.48	300.9fg±4.48
F1I3	54.8	176.02	94.59cdef±3.84	325.41bcde±3.84
F1I4	82.3	176.02	75.09f±1.45	333.41abcd±1.45
F2I0	0	176.02	124.88ab±3.69	300.9fg±3.69
F2I1	32.1	176.02	89.96def±2.31	298.08g±2.31
F2I2	22.7	176.02	123.94ab±2.03	322.66cdef±2.03
F2I3	54.8	176.02	112.97abc±5.39	343.79ab±5.39
F2I4	82.3	176.02	84.1ef±0.46	342.42abc±0.46
F3I0	0	176.02	128.84a±0.47	304.86efg±0.47
F3I1	32.1	176.02	103.03bcde±0.69	311.15defg±0.69
F3I2	22.7	176.02	106.52abcd±1.34	305.24efg±1.34
F3I3	54.8	176.02	104.2bcde±0.94	335.02abc±0.94
F3I4	82.3	176.02	91.02cdef±0.46	349.34a±0.46

注 SWS 代表土壤储水量的消耗量；表中不同小写字母表示所有处理同一列数值在 0.05 水平上差异显著。

Note SWS represent the consumption of soil water storage, different lowercase in the table indicate that all the values in the same column are significantly different at the 0.05 level.

施肥处理对作物耗水量和土壤储水量的消耗量存在正相关关系，但不显著 (表 3)，在同一灌水水平下，随着施氮量的增加，作物耗水量呈增加趋势，作物耗水量最小是 F1I0 处理，仅为 294.84 mm ，其中土壤水分消耗比例占 40.30%，在 F2I3 处理下达到 1 个最大耗水量为 343.79 mm ，其中土壤水分消耗比例占 32.86%。由于施氮量的增加，作物根系发育较好，能够更好地吸收土壤深层储水量，加大了土壤储水量的消耗，提高对土壤储水量的利用效率，以提高消耗土壤储水来补充灌溉水的不足，因此增加耗水比例中土壤耗水量，减少灌溉用水量，以达到高效节水的目的。

2.2 不同水氮处理对冬小麦 LAI 的影响

不同水氮处理对冬小麦叶面积指数 (LAI) 的影响不尽相同，基本呈随着灌水量的增加 LAI 先增大后减小的趋势，随着施氮量的增加 LAI 逐渐增加，如图 2 所示。

表 3 冬小麦全生育期干物质累积量

Table 3 Dry matter quality accumulation of winter wheat during the growth stages

kg/hm²

处理 Treatments	返青期 Seeding	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
F1	F1I0 1 452f±49.11	10 714e±1 046.06	13 458ef±835.68	17 778cd±977.45	20 540e±1 337.71
	F1I1 1 675def±393.86	11 742de±1 704.69	13 858.5def±1 337.59	18 669bcd±406.54	22 348bcde±1 416.01
	F1I2 1 658ef±212.67	11 532de±1 466.37	13 622def±806.21	17 720cd±1 302.02	21 403.5de±361.07
	F1I3 1 820cde±107.39	12 334cde±1 630.39	14 030cdef±946.00	18 542bcd±1 393.17	23 638abcd±105.57
	F1I4 1 684ef±132.73	12 626cd±1 172.79	14 386cedf±1 052.69	19 422abc±1 205.42	24 596ab±512.69
F2	F2I0 1 630def±237.66	11 524de±1 516.46	13 066f±1 188.18	16 626d±429.03	20 808e±1 552.19
	F2I1 1 730cde±183.02	12 740cd±317.51	14 398cedf±1 094.39	17 714cd±682.66	21 986cde±937.85
	F2I2 1 888cde±291.50	12 571cd±466.96	14 200cdef±1 155.94	17 666cd±741.41	21 364de±912.72
	F2I3 1 942bcd±119.85	12 610cd±1 266.66	14 520cdef±735.43	19 047abc±978.16	24 100.5abc±1 007.17
	F2I4 1 916cde±164.02	12 530cd±672.71	15 222bcd±958.48	19 428abc±624.78	22 506bcde±722.91
F3	F3I0 1 634f±145.30	12 393cde±1 368.16	15 116bcde±738.80	19 156abc±523.39	20 548e±934.62
	F3I1 2 036bc±196.22	13 674bc±954.48	15 088bcde±761.51	19 804ab±1 184.63	24 940.5ab±1 831.65
	F3I2 2 181bc±78.31	13 198cd±707.55	15 703.5abc±982.63	20 133ab±566.31	22 830bcde±695.16
	F3I3 2 178ab±63.50	14 978ab±602.51	16 302ab±1 093.12	20 154ab±1 008.02	25 368a±1 330.86
	F3I4 2 538a±115.16	16 090a±1 185.66	17 178a±326.66	21 184a±1 138.21	25 474a±1 105.44

注 表中不同小写字母表示所有处理同一列数值在 0.05 水平上差异显著。

Note Different lowercase in the table indicate that all the treatments in the same column are significantly different at the 0.05 level.

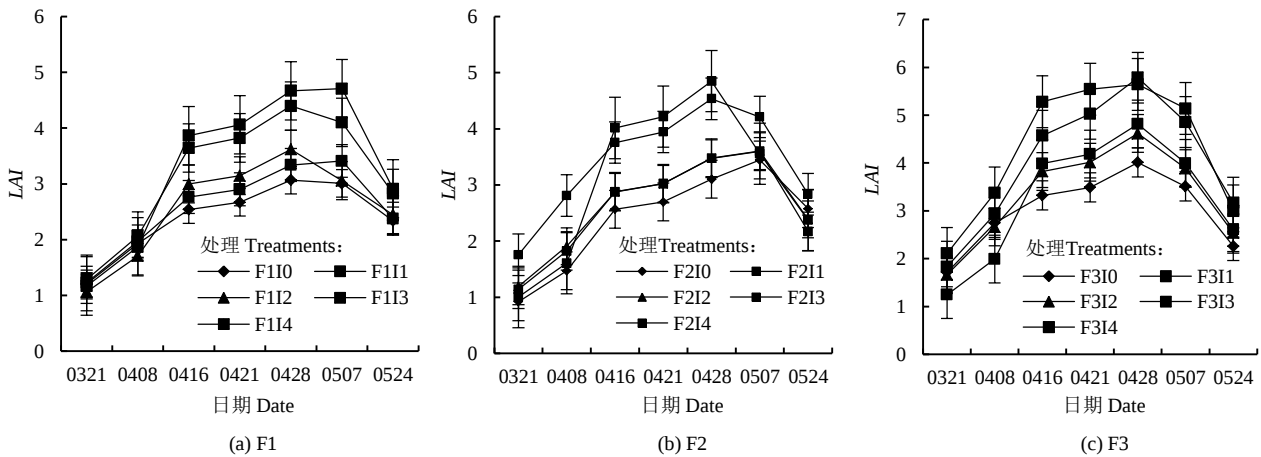


图 2 不同水氮处理下冬小麦叶面积指数动态变化

Fig.2 Dynamic changes of leaf area index under different irrigation and nitrogen treatments

在同一施氮量条件下,随着灌水量的增加 LAI 呈现先增加后减小的抛物线趋势,在拔节期—抽穗期 LAI 剧增,在抽穗—灌浆期 LAI 达到最大值,随着冬小麦进入开花期和成熟期,叶片开始枯萎变黄,叶片面积骤减,导致 LAI 减小。抽穗期在同一施氮量下 LAI 最小的处理均为 I0 处理,在低肥条件下 I4 处理的最大,为 4.67,比 I0 处理高出 52.12%,中肥条件下 LAI 最大为 I1 处理,为 4.85,比 I0 处理高出 56.45%,高肥条件下 LAI 最大为 I3 处理为 5.79,高出 I0 处理 44.14%。在相同施氮量下增加灌水量能够增加冬小麦

的叶面积指数,并且显著高于对照,促进作物吸收转化水分和作物生长。施肥能增加冬小麦叶面积指数,叶面积指数随施肥量的增加基本呈递增趋势,在 I3 处理和 I4 处理灌水量时出现先减小后增大,中肥和高肥条件下的叶面积指数显著大于低肥条件下的。在各生育期叶面积指数基本呈 F3 处理>F2 处理>F1 处理,叶面积指数在开花—灌浆期达到最大,最大处理为 F3I3,达到 5.79,同一时期最低处理为 F1I0,仅为 3.07,比 F3I3 处理低 88.6%。F1 处理在灌浆期叶面积指数达到最大,F2 和 F3 处理均在开花期后灌浆

期之前达到最大,说明增施氮肥能够加快作物生长。冬小麦叶面积指数下降速率表现为 F3 处理>F2 处理>F1 处理,说明低肥能够延缓作物衰老,延长作物生育期。

2.3 不同水氮处理对冬小麦干物质累积的影响

2017—2018 年冬小麦各氮肥处理下地上部生物量以及各营养器官干质量明显高于对照(I0)。一般在拔节期以前是冬小麦营养生长阶段,光合产物主要分配给冬小麦的根、茎、叶等营养器官,从灌浆期开始营养器官的积累量停止增加,叶和茎的干质量急剧下降,进入冬小麦成熟期,由于各营养器官衰老脱落,尤其是叶片,导致最终干物质趋于平缓。

由表 3 可知, F3I4 处理干物质质量最大。在 3 种施氮水平下, I1 比 I0 处理增加 295.5、1 216、548 kg/hm², 平均增加 2.01%、10.56%、4.37%, I2 比 I0 处理增加 863.5、566、2 282 kg/hm², 平均增加 1.22%、8.68%、3.89%, I3 比 I0 处理增加 3 098、1 698、4 820 kg/hm², 平均增加 15.08%、15.82%、23.46%, I4 比 I0 处理增加 4 056、3 292.5、4 926 kg/hm², 平均增加 19.75%、8.16%、23.97%。拔节期补灌 1 次可以显著增加干物质的累积量,各生育期的干物质质量均随灌水量的增加而增加,灌水处理的干物质质量显著大于雨养条件。在同一灌水水平下,冬小麦干物质质量各生育期均呈高肥处理>中肥处理>低肥处理,说明增加氮肥可以增加冬小麦对土壤水分的利用从而增加干物质质量,起到以肥调水的作用,有着明显的水肥耦合效应。

2.4 不同水氮处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

由表 4 所示,灌水量与产量极显著正相关,施肥量与产量相关性不显著。

在同一灌水水平下,随着施氮量的增加,产量呈正相关增长,在低氮、中氮和高氮 3 种不同氮素水平下均为在拔节期+抽穗期+成熟期补充灌溉可以达到最大产量 5 290.55、5 898.10、5 905.90 kg/hm²,且在高氮条件下的平均产量显著大于其余 2 种氮素处理下的平均产量,达到 5 344.40 kg/hm²,比中肥、低肥平均产量增产 2.36%、22.61%。在不同施氮量下 WUE 不同,基本随施氮量的增加 WUE 呈极显著增加,在高肥条件下平均 WUE 为 1.75 kg/m³,高出低肥、中肥 27.74%、6.7%。在同一施氮量水平下,在不同灌水水平中,产量最低为 I0 处理,低肥、中肥、高肥下的产量仅为 3 728.00、4 296.20、4 448.35 kg/hm²,且均在灌水量 I4 处理下达到产量最大,为 5 290.55、5 898.10、5 905.90 kg/hm²,高出对照组 41.91%、

37.29%、32.77%。在低肥处理下增加灌溉量能显著增加冬小麦产量,随着施氮量的增加,增产效果降低。尤其在增加 150 kg/hm²的纯氮,只增加了 7.8 kg/hm²的产量,投入产出比太小,不推荐以增施氮肥来提高作物产量。不同水氮处理下的水分利用效率不同(表 4), F1I0 处理水分利用效率最低是 1.26 kg/m³,水分利用效率最高的为 F2I1 处理,达到 1.88 kg/m³,超出 F1I0 处理下 49.21%。施肥量与 WUE 极显著正相关,与土壤储水量负相关,与耗水量正相关(表 5)。在 F1 处理下, I3、I4 处理显著高于 I0、I1、I2 处理(P<0.05),但 I0、I1 和 I2 处理之间无显著差异, I4 显著高于 I3 处理;在 F2 处理下,各处理之间差异显著,但 I1 处理显著大于其他处理;在 F3 处理下, I1、I2、I4 处理显著大于 I0、I3 处理,但 I0、I3 处理之间无显著差异。说明灌水能显著提高冬小麦水分利用效率,但随着施氮量的增加,增加灌水量显著降低冬小麦水分利用效率,在中肥拔节期补灌 1 次,水分利用效率可 1.81~1.96 kg/m³。

表 4 不同水氮处理产量和 WUE

处理 Treatments	产量 Yield/ (kg hm ⁻²)	水分利用效率 WUE/ (kg m ⁻³)
F1	F1I0	3 728.00g±71.88
	F1I1	3 965.50g±64.13
	F1I2	3 842.40g±17.16
	F1I3	4 927.30e±115.45
	F1I4	5 290.55c±305.65
F2	F2I0	4 296.20f±137.86
	F2I1	5 377.10cd±207.66
	F2I2	5 107.20de±89.15
	F2I3	5 504.03c±150.44
	F2I4	5 898.10ab±111.78
F3	F3I0	4 448.35f±267.28
	F3I1	5 414.04c±75.39
	F3I2	5 259.40cd±408.12
	F3I3	5 554.30bc±101.15
	F3I4	5 905.90c±66.49
F 值		
I	143.07	17.22
F	2.48	169.66
I*F	25.01	13.91

注 不同字母表示同一列所有处理在 P<0.05 水平上的差异显著性。

Note Different letters indicate significant differences at the level of P<0.05 for all treatments in the same column.

表 5 不同水氮条件下产量、千粒质量、WUE 相关性分析
Table 5 Correlation analysis of yield, 1000-grain weight and WUE under different irrigation and nitrogen conditions

指标 Inedx	I	F	SWS	ET _a	Yield	WUE	GW
I	1		-0.528*	0.877**	0.728**	0.233	0.112
F		1	-0.368	0.190	0.513	0.752**	0.127
SWS			1	0.126	-0.396	-0.578*	-0.200
ET _a				1	0.571*	-0.05	0.016
Yield					1	0.791**	0.308
WUE						1	0.357
GW							1

注 GW 代表千粒质量。*和**分别表示水、氮或水氮交互作用在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著，下同。

Note GW represent 1000-grain weight. * and ** indicate that water, nitrogen, or water-nitrogen interactions are significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively, same as below.

3 讨论

3.1 地上部干物质质量

不同水平的水肥处理显著影响冬小麦地上部干物质质量的积累和作物产量^[13]，刘小飞等^[16]研究表明，在高施肥水平下中度水分亏缺可以促进冬小麦营养器官花前贮藏物质向籽粒的再转运，不同施肥水平营养器官花前贮藏同化物总运转量对籽粒产量的贡献率随水分调亏加重而提高。马武光^[15]研究得到在干旱年条件下冬小麦地上部干物质质量比丰水年减少 17.5%，陈凯丽等^[20]认为在各灌水下限处理中，增加施氮量并不有利于小麦干物质积累，适当施氮量才有利于干物质积累。而在本研究中，干旱年条件下，当氮肥水平从 F1 增加到 F2 或灌水量从 I0 增加到 I1，冬小麦成熟期地上部干物质质量显著增加，这与薛丽华等^[8]、殷修帅等^[18]研究结果基本一致，在只灌 1 水的情况下，低肥（F1）和高肥（F3）条件下只灌抽穗水比只灌拔节水能够更加促进地上部干物质的积累量。F3I4 处理地上部干物质质量最大，但仅比 F3I1 处理高 2.14%。由此可见，适宜的灌溉和施氮有利于增加冬小麦地上部干物质质量，而过量灌溉和施氮均不能够显著增加冬小麦干物质质量，而且会造成淡水资源的浪费和环境破坏。

3.2 产量和水分利用效率

土壤含水率和土壤养分状况是影响作物生长的主要因素，且二者存在明显的交互效应，适当增加灌水量和施肥量能提高农作物产量和水分利用效率^[10-12,14]。

罗赛阳^[22]研究得到灌水是显著增加穗数而增加产量，施肥显著提高各产量要素从而实现增产；宋明

丹等^[23]研究表明灌水和施肥对产量及产量构成要素均无显著影响。张珂珂^[24]认为适量补水处理的水分利用效率明显高于充足供水处理，吕丽华^[25]研究表明在降雨较少年份不灌溉水处理产量最低，灌溉 1 水到 5 水的产量无显著差异，但 WUE 却大大降低，全生育期不灌水 WUE 最高，灌溉 1 水到 5 水依次减小。梁硕硕等^[30]通过 6 a 试验的研究表明，在干旱年，随着灌水频率增加，产量也明显随之增加，在干旱年份有限灌水在冬小麦不同生育期的分配对产量的影响更显著。

本试验冬小麦生育期内降雨量达到 176 mm，属于干旱年。在陕西关中缺水地区，提高作物水分利用效率至关重要，本研究表明，灌水对产量有着极显著影响，对水分利用效率无显著性影响，施肥对产量无显著性影响，与水分利用效率有极显著的正相关关系。

在本研究中，在不同水氮处理下，随着灌水量和施肥量的增加产量和水分利用效率均呈先增加后减少的趋势，且均是在只灌拔节水条件下达到最大。且冬小麦产量在 F3I4 处理下达到最大，WUE 在 F2I1 处理下达到最大，只比最高产量低 528.8 kg/hm²，仅减产 8.95%，用增加 1 倍的氮肥施用量只增加 8.95% 的产量，虽然显著增加作物产量，但是会对土壤质量造成严重损伤。本研究产量偏低是因为灌水量相对于其他研究偏低，因此在实际应用中应根据实际情况进行调整。

4 结论

灌溉和施肥能显著增加冬小麦叶面积指数、地上部干物质质量、产量以及 WUE。F3I4 处理（施氮量 150 kg/hm²、全生育期补充灌溉 3 次）产量为 5 905.9 kg/hm²，WUE 为 1.74 kg/m³；F2I1 处理（施氮量 150 kg/hm²、拔节期补充灌溉 1 次）产量为 5 377.1 kg/hm²，WUE 为 1.88 kg/m³，WUE 增加 8.05%，产量仅比最大产量降低 8.95%，比 F1I0 处理 WUE 提高 48.77%，同时仅消耗土壤贮水量 77.73 mm，对于土壤保水保墒有明显促进作用，使得水资源得到最大程度利用，既减少氮肥的施用量又节约了灌溉用水量，达到最终高效节水、减少氮肥施用量的目的，因此推荐 F2I1 处理作为陕西关中地区适宜的水肥管理措施。

参考文献：

- [1] SONG Y L, LINDERHOLM H W, WANG C Y, et al. The influence of excess precipitation on winter wheat under climate change in China from 1961 to 2017[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 690: 189-196.
- [2] 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.

- ZHANG Xiaopei, WANG Hezhou, ZHOU Xinguo, et al. Combined impact of irrigation and nitrogen application at the jointing stage on water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 19-26.
- [3] 王凯瑜, 李援农, 方恒, 等. 覆膜集雨补灌对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(8): 718-723.
- WANG Kaiyu, LI Yuannong, FANG Heng, et al. Effects of plastic-film mulching and supplementary irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37(8): 718-723.
- [4] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(12): 2 379-2 389.
- YAO Ning, SONG Libing, LIU Jian, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2 379-2 389.
- [5] 邢素丽, 杜金钟, 刘孟朝, 等. 大尺度冬小麦-夏玉米微喷灌精准自动施肥增产效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 100-106.
- XING Suli, DU Jinzhong, LIU Mengchao, et al. Yield increasing effect of precision automatic fertilization and micro-spray irrigation for winter wheat-summer maize in large-scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 100-106.
- [6] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 373-376.
- YANG Xinquan, FENG Feng, SONG Changqing, et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 373-376.
- [7] 张烨. 《陕西区域统计年鉴—2018》[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [8] 薛丽华, 赵连佳, 孙诗仁. 水氮耦合对滴灌冬小麦光合特性、产量及水氮利用效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(30): 12-19.
- XUE Lihua, ZHAO Lianjia, SUN Shiren. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics, yield and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(30): 12-19.
- [9] 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.
- LI Zhengpeng, SONG Mingdan, FENG Hao. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 195-202.
- [10] 秦姗姗, 侯宗建, 吴忠东, 等. 水氮耦合对冬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(5): 440-447.
- QIN Shanshan, HOU Zongjian, WU Zhongdong, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen absorption and yield of winter wheat[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(5): 440-447.
- [11] WANG L L, PALTA J A, CHEN W, et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 41-53.
- [12] WANG L, DONG S T, LIU P, et al. The interactive effects of water and nitrogen addition on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1 919-1 927.
- [13] MAHBOD M, SEPASKHAH A R, ZANDPARSA S. Estimation of yield and dry matter of winter wheat using logistic model under different irrigation water regimes and nitrogen application rates[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12): 1 661-1 676.
- [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): 1 050-1 059.
- 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): 1 050-1 059.
- [15] 马武光. 关中地区不同降水年型下冬小麦生长及根区土壤水分利用特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- MA Wuguang. Characteristics of winter wheat growth and soil moisture utilization in root zone under different precipitation years in Guanzhong area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [16] 刘小飞, 费良军, 孟兆江, 等. 水分养分协同对冬小麦干物质运转和氮吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 905-914.
- LIU Xiaofei, FEI Liangjun, MENG Zhaojiang, et al. Interactive effects of water and fertilization on biomass translocation and nitrogen uptake and utilization of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(4): 905-914.
- [17] 杨万忠. 不同水分条件下平衡施肥对土壤水肥状况及冬小麦产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- YANG Wanzhong. Effects of balanced fertilization on water and nutrient of soil and winter wheat yield under different water conditions[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [18] 殷修帅, 王仕稳, 邓西平, 等. 不同施氮水平下拔节期灌溉对旱地冬小麦的群体动态、产量及耗水特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 179-186.
- YIN Xiushuai, WANG Shiwen, DENG Xiping, et al. Effect of irrigation on population dynamics, yield and water consumption characteristics of winter wheat at elongation stage under different nitrogen application levels in dryland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 179-186.
- [19] 薛丽华, 赵连佳, 陈兴武, 等. 施氮量对滴灌冬小麦光合特性、产量及氮素利用效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(10): 11-16.
- XUE Lihua, ZHAO Lianjia, CHEN Xingwu, et al. Effect of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen utilization efficiency of winter wheat under drip irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(10): 11-16.
- [20] 陈凯丽, 赵经华, 付秋萍, 等. 不同水氮处理对滴灌冬小麦生长、产量和耗水特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 125-132.
- CHEN Kaili, ZHAO Jinghua, FU Qiuping, et al. The effects of different water and nitrogen treatments on the growth, yield and water consumption characteristics of winter wheat[J]. *Agricultural Research in*

- the Arid Areas, 2018, 36(4): 125-132.
- [21] 韩美坤. 冬小麦贮藏旱作产量形成与水氮利用特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- HAN Meikun. Yield formation and water-nitrogen use characteristics of No-irrigating winter wheat under storing available soil water before sowing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [22] 罗赛阳. 不同水肥条件对冬小麦干物质积累及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- LUO Saiyang. Effects of accumulation of dry matter and yield of winter wheat under different irrigation and fertilization conditions[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [23] 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, 2016, 32(2): 119-126.
- [24] 张珂珂. 减氮补水对冬小麦生长发育及水氮利用效率的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- ZHANG Keke. Effects of reduced nitrogen application and supplemental irrigation on growth and water-nitrogen use efficiency of winter wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [25] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3 839-3 849.
- LYU Lihua, DONG Zhiqiang, ZHANG Jingting, et al. Effect of Water and Nitrogen on Yield and Nitrogen Utilization of Winter Wheat and Summer Maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3 839-3 849.
- [26] 吴宝建. 畦田节水灌溉对冬小麦耗水特性、产量和水分利用效率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- WU Baojian. Effects of water-saving by border irrigation on water consumption characteristics, grain yield and water use efficiency in winter wheat[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [27] 马守臣, 张伟强, 段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 9-14.
- MA Shouchen, ZHANG Weiqiang, DUAN Aiwang. Effects of different deficit irrigation modes on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 9-14.
- [28] 梁浩, 胡克林, 李保国. 不同施肥管理模式下农田氮素淋失及水氮利用效率模拟分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1 317-1 325.
- LIANG Hao, HU Kelin, LI Baoguo. Simulation and analysis of nitrate leaching and water and nitrogen use efficiencies in farmland under organic and mineral fertilizer management practices[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(7): 1 317-1 325.
- [29] 闫建文, 史海滨. 氮肥对不同含盐土壤水盐和小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 50-53.
- YAN Jianwen, SHI Haibin. Effect of nitrogen fertilizer on yield of wheat and soil moisture and salinity of different salinity soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4): 50-53.
- [30] 梁硕硕, 关劼兮, 李璐, 等. 水分处理对冬小麦生育期耗水分配及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 52-59.
- LIANG Shuoshuo, GUAN Jiexi, LI Lu, et al. Impact of irrigation schedules on yield, water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 52-59.
- [31] SHARMA B D, KAR S, CHEEMA S S. Yield, water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter wheat[J]. Fertilizer Research, 1990, 22(2): 119-127.
- [32] HSIAO T C. Growth and productivity of crops in relation to water status[C]. Almeria(Spain): International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 1992.
- [33] SAEIDI M, ABDOLI M. Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(4): 885-898.
- [34] 张黛静, 王艳杰, 陈倩青, 等. 不同耕作与施肥对小麦氮吸收效率、根效率及产量的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 85-91.
- ZHANG Daijing, WANG Yanjie, CHEN Qianqing, et al. Effects of different tillage and fertilization on wheat nitrogen absorption efficiency, root efficiency and yield[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(5): 85-91.

Effects of Supplementary Irrigation on Biomass, *WUE* and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Fertilizer Conditions

HU Hongwei^{1,2,3}, CAI Huanjie^{1,2,3*}, WANG Xingyu^{1,2,3}, SUN Yanan^{1,2,3}, WANG Yunfei^{1,2,3}

(1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2. College of Water Research and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Background】 There was a lack of reasonable irrigation and fertilizer management measures in Guanzhong area of Shaanxi province, which has become a restricting factor to the development of agricultural production in arid areas of China. 【Objective】 The objective of this experiment was to optimize the schedule of irrigation and nitrogen fertilization in agriculture, carry out the experiment of winter wheat irrigation and fertilization

management strategy, conduct a field experiment of different nitrogen fertilizer application rates with different irrigation amounts, measure the growth index of winter wheat, and explore the reasonable irrigation amounts and nitrogen fertilization for high yield of winter wheat in arid years in Guanzhong, Shaanxi. 【Method】 Setting up two factors including irrigation frequency and nitrogen fertilization, we compared five irrigation frequencies: no irrigation in the whole stages (I0), irrigating at the jointing stage (I1), irrigating at the heading stage (I2), irrigating at the jointing stage and heading stage (I3), irrigating at the filling stage (I4), and three nitrogen fertilization levels were set (F1: 75 kg/hm², F2: 150 kg/hm², F3: 300 kg/hm²). 【Result】 ①There was a significant positive correlation between irrigation and crop water consumption on winter wheat *ET*, and with the increase of irrigation volume, dry rain-fed cultivation enhanced the absorption and utilization of soil water storage, and vacated corresponding soil water storage capacity after harvest. There was a positive effect between soil water requirement and nitrogen fertilization, but was not significant, which slightly increased with nitrogen application. ②Under the same irrigation frequency, the aboveground dry matter quality of winter wheat showed the same regularity: high nitrogen fertilization>middle nitrogen fertilization>low nitrogen fertilization. Increasing nitrogen fertilization can significantly increase the dry matter weight of the crop. Under the same nitrogen fertilization, dry matter increased with irrigation volume, and there was a significant positive effect in dry matter by irrigating winter wheat in jointing stage. ③There was a significant effect between irrigation and yield, also a positive correlation between irrigation and WUE, although the impact on WUE was not significant. The influence of fertilization on yield was not significant, but there was a positive correlation, which had an extremely positive correlation on WUE. The minimum yield was 3 728.00 kg/hm² of F1I0 treatment, and the maximum yield was 5 905.90 kg/hm² of F3I4 treatment, which was 58.42% higher than that of F1I0 treatment. The WUE of F2I1 treatment was 1.88 kg/m³, and the yield was 5 377.1 kg/hm², which was 48.77% higher than WUE of F1I0 treatment and 44.24% higher than yield of F1I0 treatment. 【Conclusion】Under the arid year, nitrogen application of 150 kg/hm² and supplementary irrigation once at jointing stage (F2I1) were relatively more appropriate and effective irrigation and fertilization management measures in Guanzhong area of Shaanxi province.

Key words: irrigation; yield; WUE; biomass; winter wheat

责任编辑：白芳芳

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动, 每年评选优秀论文 10 篇, 每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书, 届时将在期刊网站首页展示, 同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部