

灌水和施氮对甘肃河西绿洲春小麦 生长及产量的影响

吴立峰,张富仓,张 鹏,李志军,周罕觅

(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】研究不同灌水、施氮措施对甘肃河西绿洲春小麦生长、产量和水分利用的影响。【方法】在甘肃河西绿洲地区,以春小麦品种永良 4 号为试验材料,在春小麦不同生育期进行灌水(充分灌水(CK),拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期不灌水 5 个水平)及施氮(施纯氮 0,120,180 kg/hm²)完全组合设计,共计 15 个处理,通过大田小区试验,研究灌水和施氮对春小麦株高、叶面积指数(LAI)、冠层干物质质量、籽粒产量、产量构成要素、水分利用效率(WUE)及灌溉水利用效率(IWUE)的影响。【结果】不同灌水处理对春小麦的株高、叶面积指数、冠层干物质质量、籽粒产量、穗粒数、千粒质量、WUE 和 IWUE 均有一定的影响。春小麦永良 4 号的水分敏感期为拔节期,其次为抽穗期、灌浆期和成熟期。拔节期不灌水后复水对春小麦后期株高有一定的补偿效应,但补偿能力有限。与 CK 相比,拔节期不灌水处理的冠层干物质质量降低了 42.41%,籽粒产量和 WUE 分别降低了 38.09%和 12.09%,且穗粒数也降低了 39.01%;抽穗期不灌水处理的冠层干物质质量降低了 33.94%,籽粒产量和 WUE 分别降低了 35.35%和 10.69%,且穗粒数和千粒质量分别降低了 16.64%和 11.60%;灌浆期不灌水处理的冠层干物质质量降低了 20.80%,籽粒产量和 WUE 分别降低了 33.06%和 12.58%,且穗粒数和千粒质量分别降低了 18.19%和 11.97%;成熟期不灌水处理的冠层干物质质量下降不明显,产量降低了 5.98%,而 WUE 提高了 21.38%;施氮可以提高春小麦的株高、LAI、冠层干物质质量、籽粒产量、收获指数和穗粒数。成熟期不灌水和充分灌水处理的春小麦籽粒产量、WUE 和 IWUE 随施氮量增加而升高,而拔节期、抽穗期、灌浆期不灌水处理的春小麦籽粒产量、WUE 和 IWUE 随施氮量的增加呈先升高后降低趋势。【结论】不同灌水条件下,适量施氮可以提高春小麦的 WUE 和 IWUE;春小麦成熟期不灌水、施纯氮 180 kg/hm²,为甘肃河西绿洲地区较适宜的灌水施肥措施。

【关键词】 河西绿洲;春小麦;生育期灌水;施氮;产量;水分利用效率

【中图分类号】 S512.1⁺20.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)07-0055-09

Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on growth and yield of spring wheat in Hexi oasis of Gansu

WU Li-feng,ZHANG Fu-cang,ZHANG Peng,LI Zhi-jun,ZHOU Han-mi

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】 This paper is to study the effect of different irrigation and nitrogen fertilizer on growth,yield and water use of spring wheat in Hexi oasis of Gansu province.【Method】 With Yongliang 4 as test material,irrigation at different growth stages(full irrigation(CK),no irrigation at jointing,tassel,milky and mature 5 level) of spring wheat and nitrogen fertilizer (nitrogen 0,120,180 kg/hm² 3 level) complete combination design were provided to carry out field plot experiments to study effect of irrigation and

* [收稿日期] 2010-12-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879073)

[作者简介] 吴立峰(1985—),男,黑龙江阿城人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:china_sw@163.com

[通信作者] 张富仓(1962—),男,陕西武功人,教授,博士,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

E-mail:zhangfucang@tom.com

nitrogen fertilizer on plant height, leaf area index(LAI), canopy dry matter, grain yield, yield component factors, water use efficiency(WUE) and irrigation water use efficiency(IWUE) of spring wheat. **【Result】** There were some effects of irrigation at different growth stages on plant height, LAI, canopy dry matter, grain yield, grains per spike, 1 000-grain weight, WUE and IWUE. Jointing stage was most water sensitive period rather than tassel, milky and mature stage of spring wheat Yongliang 4 in Hexi oasis. Rewatering after no irrigation at jointing stage had a significant compensation effect on spring wheat height, but it was limited. Compared with CK, canopy dry matter of spring wheat of no irrigation at jointing stage reduced by 42.41%, grain yield and WUE reduced by 38.09% and 12.09%; canopy dry matter of no irrigation at tassel stage reduced by 33.94%, grain yield and WUE reduced by 35.35% and 10.69%; canopy dry matter of no irrigation at milky stage reduced by 20.80%, grain yield and WUE have reduced by 33.06% and 12.58%; there is no significant effect on canopy dry matter of no irrigation at mature stage, but grain yield reduced by 5.98% and WUE increased by 21.38%; 1 000-grain weight of no irrigation at tassel stage and milky treatments reduced by 11.60% and 11.97%, respectively. Nitrogen fertilizer could increase plant height, LAI, canopy dry matter, grain yield, harvest index and grains per spike. WUE and IWUE of no irrigation at mature stage and full irrigation increased with the increased of nitrogen fertilizer, but those of no irrigation at jointing, tassel and milky stage increased and then decreased. **【Conclusion】** Proper nitrogen fertilizer rate could increase WUE and IWUE; the treatment of no irrigation at mature stage and 180 kg/hm² of nitrogen seemed to be the appropriate measure.

Key words: Hexi oasis; spring wheat; irrigation at growth stage; nitrogen fertilizer; yield; water use efficiency

甘肃河西绿洲地区属于典型的大陆干旱荒漠气候,该地区大部分处于干旱或极度干旱区,多年平均降水量为 139.2 mm,多年平均蒸发量为 1 614.6 mm。2002 年,河西地区水资源总量为 61.6 亿 m³,人均水资源量为 1 324.6 m³,低于全国人均水平(2 135 m³),人均水资源和耕地平均可利用水资源量仅占全国平均水平的 24.3%和 13.3%^[1-2]。尽管如此,目前在河西绿洲地区,其主要农作物如春小麦和春玉米的农田灌水方式仍以大水漫灌为主,冬季进行贮水灌溉,灌水定额高达 200 mm,春小麦生育期内一般灌水 4~5 次,每次灌水定额也在 100 mm 以上。由于该地区多年平均径流量很小,最大年径流深仅为 282 mm^[3],加之上游的不合理利用,造成了下游水资源严重不足,农田作物灌溉抽取了大量的地下水,引起了地下水位的大幅下降,加剧了该地区水资源紧缺现象。同时,该地区农田肥料施用量很大,特别是纯氮的施用量高达 200 kg/hm²,过量的施肥和灌水不仅造成了水肥的损失,而且引起了土壤物理性质变差及农田的面源污染。因此,研究节水节肥的作物灌溉施肥制度,不仅对保证农作物用水及提高农田水肥综合利用效率有重要作用,而且对改善农田水肥环境和缓解该地区水资源紧缺

有重要的意义。

在作物水分、养分管理方面,许多学者^[4-7]已进行了大量的研究,认为适宜的控水可以轻度影响叶片生长,但会促进根系的生长,从而影响并使光合同化产物向有利于生产的方向分配,复水后会经历一个补偿生长期,控水期间减少的生物量将得以补偿,从而达到在不影响作物产量的条件下提高水分利用效率的目的。氮肥也是影响小麦生长的关键因素之一,合理施用氮肥可促进小麦叶片和根系的发育,增强叶片光合作用和根系吸水作用,提高作物水分和养分的利用能力,但在不同干旱条件下氮肥对水分利用效率的提高作用并不相同,且在严重干旱条件下,氮肥对作物产量和水分利用效率的提高作用非常有限^[8-10]。综观现有研究发现,尚缺乏关于节水灌溉制度与施肥制度相结合的灌溉施肥模式及其对作物效应的研究探索,故本研究将以甘肃河西绿洲地区大田实际应用为背景,通过灌水量和施氮量完全组合设计,研究不同灌水和施氮组合条件对河西地区春小麦生长、产量和水分利用效率的影响,以期确定适宜该地区的灌溉施肥制度,为河西地区春小麦的生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2010 年 3 月下旬至 7 月下旬在甘肃武威石羊河流域农业与生态节水试验站进行。试验站位于甘肃省武威市凉州区,地处腾格里沙漠边缘(37°50′49″N,102°51′01″E)。海拔 1 500 m,为大陆性温带干旱气候,该地区年平均气温 8 ℃,>0 ℃积温 3 550 ℃左右。年均日照时数 3 000 h,年均降水量不足 200 mm,年均水面蒸发量 2 000 mm。试验地耕作层土壤质地为灰钙质轻砂壤土,根层土壤干体积质量为 1.32 g/cm³,田间持水量为 36.58%(体积含水率),地下水埋深在 30 m 以下。供试作物为春小麦,品种为永良 4 号。

2010 年春小麦生长期有效积温为 1 948 ℃,降雨量为 64 mm,略低于该地区近 50 年 3—7 月的平均降雨量(79.4 mm),且主要集中在 5 月底至 6 月初以及 7 月中旬。经过 Penman-Monteith 公式计

算,春小麦生长期的潜在腾发量为 498 mm。

1.2 试验设计

试验设灌水与施氮 2 个因素,其中施氮因素设 3 个水平,分别为 N₀(0 kg/hm² N)、N₁(120 kg/hm² N)和 N₂(180 kg/hm² N)。N₁ 处理中 120 kg/hm² N 全部为底肥;N₂ 处理中 100 kg/hm² N 为底肥,80 kg/hm² N 在第 1 次灌水(05-05 播后 35 d)前施入;所有处理均施过磷酸钙 450 kg/hm² (含 P₂O₅16%)。灌水因素设 5 个水平,具体灌水方案见表 1,其中以充分灌水作为对照(CK),I₁、I₂、I₃、I₄ 处理为拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期不灌水处理。以上 2 个因素进行完全组合设计,共计 15 个处理,每处理设 3 个重复,小区面积为 3.5 m×4.5 m,按顺序布设。播种日期为 2010-03-31,收获日期为 2010-07-24。小区灌水方式为畦灌,灌水量由水表控制,灌水日期分别为 05-05(播后 35 d)、05-31(播后 61 d)、06-20(播后 80 d)和 07-10(播后 101 d)。

表 1 春小麦灌水的试验方案

Table 1 Irrigation scheme of spring wheat experiment		mm			
灌水水平 Irrigation level	灌水量 Irrigation quantity				灌溉定额 Irrigation quota
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage	
对照 CK	90	90	90	75	345
I ₁	—	90	90	75	255
I ₂	90	—	90	75	255
I ₃	90	90	—	75	255
I ₄	90	90	90	—	270

1.3 测定项目与方法

1.3.1 春小麦株高和叶面积指数的测定 分别于春小麦拔节期(播后 50 d)、抽穗期(播后 67 d)、灌浆期(播后 86 d)和成熟期(播后 107 d),每处理随机选取 10 株小麦,用米尺测定植株高度;分别于春小麦拔节期(播后 52 d)、抽穗期(播后 67 d)、灌浆期(播后 87 d)和成熟期(播后 107 d),选取无云无风天气,于当日 14:00 用 Sunscan 冠层分析系统测定春小麦叶面积指数(LAI),并在 1 h 内完成测定,原计划株高和叶面积指数于同一天内进行测定,但由于天气原因,故二者测定日期有 1~2 d 偏差;在每个生育期末拔节期(播后 60 d)、抽穗期(播后 79 d)、灌浆期(播后 100 d)和成熟期(播后 115 d),每处理随机选取 10 株春小麦采集其地上部分,105 ℃杀青 30 min,然后 80 ℃烘至质量恒定,用 1/100 天平称质量测定冠层干物质量。

1.3.2 春小麦产量及其构成要素的测定 收获时,在试验小区取 1 m² 样区,将地上部全部收获,随机

取 10 株春小麦,测定穗粒数,然后再测定每个样区穗数,风干后称质量并计算千粒质量、籽粒产量和冠层干物质量。

1.3.3 收获指数(HI)的计算 收获指数=样区的籽粒产量/样区冠层干物质量。

1.3.4 作物耗水量的计算 作物耗水量的计算公式为:

$$ET=P+U+I-R-F-\Delta W。$$
 (1)

式中:ET 为作物耗水量,P 为降水量,U 为地下水补给量,I 为灌水量,R 为径流量,F 为深层渗漏量,ΔW 为试验初期和末期土壤水分变化量。式中各分量单位均以 mm 计。

根据试验区实际情况,式(1)中地下水补给量、径流量和深层渗漏量均忽略不计,故上式简化为:

$$ET=P+I-\Delta W。$$
 (2)

1.3.5 作物水分利用效率的计算 灌溉水利用效率(IWUE,单位为 kg/(hm²·mm))用公式 IWUE=Y/I 计算,水分利用效率(WUE,单位为

kg/(hm² · mm))用公式 $WUE=Y/ET$ 计算,其中 Y 为春小麦籽粒产量(单位为 kg/hm²)。

1.4 数据分析

数据分析采用 PASW Statistics 18 进行,对不同处理间的指标进行方差分析,若差异显著($P\leq 0.05$),则进行 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 灌水和施氮对不同生育期春小麦株高及叶面积指数的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,拔节期(播后 50 d)和抽穗期(播后 67 d)不灌水对株高有明显的抑制作用,灌浆期(播后 86 d)和成熟期(播后 107 d)不灌水对株高的影响不大,而且成熟期与灌浆期相比株高没有明显增加。 I_1 与 CK 相比,拔节期 N_0 、 N_1 和 N_2 处理株高分别下降了 26.02%,37.84%和 28.39%,在复水后 6 d(抽穗期),25 d(灌浆期),46 d(成熟

期)时 I_1 与 CK 相比, N_0 、 N_1 和 N_2 处理的株高分别下降了 19.75%,26.62%,30.09%;19.95%,20.11%,14.81%;19.05%,17.41%,15.06%。 I_2 与 CK 相比,抽穗期 N_0 、 N_1 和 N_2 处理株高分别降低了 7.46%,7.06%和 8.51%,复水后 6 d(灌浆期)和 27 d(成熟期), N_0 、 N_1 和 N_2 处理株高仍较 CK 分别降低了 16.57%,15.67%,11.99%;16.35%,11.27%,13.62%。以上结果说明拔节期不灌水处理使春小麦株高均有不同程度降低,复水后株高明显增加,表现出了一定的补偿作用;抽穗期不灌水处理对小麦株高产生了明显的抑制作用,复水后株高增长无明显补偿效应。在不同灌水水平下, N_0 处理的株高均显著低于 N_1 和 N_2 处理,但 N_1 与 N_2 处理间的差异较小。以上结果表明,不施氮肥明显抑制了株高的生长,在缺少灌水情况下,不施氮肥对株高的抑制作用更为明显,但 N_1 和 N_2 处理对株高的影响差异不大。

表 2 灌水和施氮对不同生育期春小麦株高及叶面积指数的影响

Table 2 Effect of irrigation and nitrogen fertilization on plant height and LAI of spring wheat at different growth stages									
灌水水平 Irrigation level	施氮水平 Nitrogen level	株高/cm Plant height				叶面积指数 LAI			
		拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage
CK	N_0	22.87 b	50.93 e	65.80 e	65.63 e	0.96 c	2.03 d	1.33 f	1.30 c
	N_1	31.97 a	68.00 c	87.87 a	86.33 b	2.30 b	4.48 bc	4.10 bc	2.60 b
	N_2	32.33 a	70.61 bc	88.63 a	90.50 a	3.04 ab	5.27 abc	5.50 a	4.77 a
I_1	N_0	16.92 d	40.87 h	52.67 g	53.13 g	0.87 c	1.71 d	1.10 f	1.07 c
	N_1	19.87 c	49.90 ef	70.20 d	71.30 d	1.12 c	2.36 d	2.37 de	2.80 b
	N_2	23.15 b	49.36 ef	75.50 bc	76.87 c	1.50 c	2.59 d	2.60 d	2.53 b
I_2	N_0	25.17 b	47.13 g	54.90 g	54.90 g	1.08 c	2.01 d	1.23 f	1.40 c
	N_1	33.18 a	63.20 d	74.10 c	76.60 c	2.80 ab	4.21 c	3.23 cd	3.27 b
	N_2	34.35 a	64.60 d	78.00 b	78.17 c	3.13 a	5.43 ab	3.97 bc	3.27 b
I_3	N_0	24.20 b	50.87 e	60.60 f	60.63 f	1.12 c	2.30 d	1.27 f	1.23 c
	N_1	32.18 a	72.73 a	87.03 a	84.83 b	2.73 ab	4.93 abc	3.70 bc	3.00 b
	N_2	33.25 a	70.79 c	86.03 a	89.13 a	3.20 a	5.71 a	3.80 bc	3.27 b
I_4	N_0	23.90 b	50.10 ef	64.70 e	65.80 e	1.17 c	2.16 d	1.50 ef	1.37 c
	N_1	31.95 a	71.50 ab	87.83 a	87.20 a	2.46 ab	4.53 bc	4.50 b	2.47 b
	N_2	33.48 a	71.06 bc	88.43 a	89.67 a	2.75 ab	5.18 abc	5.87 a	4.13 a

注:表中数据为 3 个重复的平均值;同列数据后标不同小写字母者表示在 $P=5\%$ 水平有显著性差异。表 4 和表 6 同。
Note: The numbers on the table is means of three repeats;different small letters in the same column means significant difference in Duncan ($P=0.05$). The same as table 4 and table 6.

由表 3 可知,除拔节期灌水与施氮交互作用对春小麦株高影响不显著外,在其他生长阶段,灌水和施氮及其交互作用对春小麦株高均有显著或极显著影响。

由表 2 还可知,各处理 LAI 随着生育期的推进表现出低-高-低的趋势,但不同处理出现最大值的时间不同。拔节期 I_1 处理春小麦 LAI 均低于 CK,该灌溉条件下 N_0 、 N_1 和 N_2 处理的 LAI 与 CK 相比

分别降低了 9.38%,51.30%和 50.66%;复水后的抽穗期、灌浆期以及成熟期, I_1 处理的 LAI 也一直低于 CK, N_0 、 N_1 和 N_2 处理的 LAI 分别降低了 15.76%,47.32%,50.85%;17.29%,42.20%,52.73%;17.70%,−7.70%,46.96%。说明拔节期不灌水处理后复水对叶面积生长的促进作用不明显。与充分灌水的 CK 相比,抽穗期 I_2 处理对 LAI 影响不大;复水后从灌浆期至成熟期, N_0 、 N_1 和 N_2

处理的 LAI 分别比 CK 降低了 7.52%,21.22%,27.82%;-7.70%,-21.70%,31.44%。说明抽穗期叶片已经发育成熟,该生育期不灌水对 LAI 影响不大,但随着复水时间的延长,抽穗期不灌水后春小麦因缺水而使其叶片老化,故 LAI 下降,但 LAI 下降到一定程度后不再降低。与 CK 相比,灌浆期和成熟期不灌水处理对 LAI 影响较小。不同灌水条件下,LAI 随着施氮量的增加而升高,且 N₁ 和 N₂

处理的 LAI 总体上均显著高于 N₀ 处理,但 N₁ 与 N₂ 处理之间总体上差异较小。以上结果说明氮素主要用于叶片的生长发育,增施氮肥有利于提高 LAI;在拔节期或抽穗期不灌水时,土壤水分不足会降低 LAI,施氮可以在一定程度上提高 LAI。

由表 3 可知,在春小麦不同生育期灌水和施氮及其交互作用对 LAI 均有显著影响。

表 3 灌水和施氮对不同生育期春小麦株高及叶面积指数影响的显著性分析

Table 3 Significance test for the effect of irrigation and nitrogen fertilization on plant height and LAI of spring wheat at different growth stages

方差来源 Source	株高 Plant height				叶面积指数 LAI			
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage
灌水水平 Irrigation level	122.877**	152.883**	178.152**	359.261**	16.096**	28.455**	13.040**	3.662*
施氮水平 Nitrogen level	180.749**	510.097**	2 914.316**	13 682.583**	19.156**	30.475**	154.861**	91.964**
灌水×施氮水平 Irrigation×Nitrogen level	1.838	8.109**	3.629*	4.445*	4.424**	3.394*	3.850*	3.634*

注: * 表示影响显著, ** 表示影响极显著,表 5 和表 7 同。

Note: * meant significant difference,while ** meant much significant difference. The same with table 5 and table 7.

2.2 灌水和施氮对春小麦冠层干物质积累的影响

灌水和施氮对不同生育期春小麦冠层干物质量

的影响见表 4。

表 4 灌水和施氮对不同生育期春小麦冠层干物质量的影响

Table 4 Effect of irrigation and nitrogen fertilization on canopy dry matter of spring wheat at different growth stages

灌水水平 Irrigation level	施氮水平 Nitrogen level	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage
CK	N ₀	0.45 ab	0.88 cd	1.47 def	1.93 de
	N ₁	0.46 ab	1.50 ab	2.88 a	3.83 ab
	N ₂	0.41 ab	1.61 ab	3.35 a	4.05 a
I ₁	N ₀	0.33 b	0.74 d	1.15 f	1.27 f
	N ₁	0.43 ab	1.23 bc	1.53 cdef	2.26 d
	N ₂	0.38 ab	1.49 ab	1.78 bcde	2.12 de
I ₂	N ₀	0.47 ab	0.82 cd	1.21 f	1.33 f
	N ₁	0.45 ab	1.38 ab	2.20 b	2.80 c
	N ₂	0.47 ab	1.50 ab	2.02 bcd	2.35 cd
I ₃	N ₀	0.53 a	0.88 cd	1.39 ef	1.64 ef
	N ₁	0.52 a	1.44 ab	1.82 bcde	2.79 c
	N ₂	0.47 ab	1.60 ab	2.06 bc	3.34 b
I ₄	N ₀	0.43 ab	0.84 cd	1.64 cdef	2.00 de
	N ₁	0.46 ab	1.45 ab	2.85 a	3.64 ab
	N ₂	0.48 ab	1.69 a	3.37 a	3.74 ab

从表 4 可知,不同施氮条件下,不同灌水处理对冠层干物质量的影响不同。在拔节期(播后 60 d),I₁ 与 CK 相比,N₀、N₁ 和 N₂ 处理的冠层干物质量分别下降了 26.67%,6.52%和 7.31%,且对 N₀ 的影响最为明显;在复水后的抽穗期、灌浆期以及成熟期,N₀、N₁ 和 N₂ 处理的冠层干物质量分别比 CK 处理下降了 15.90%,18.00%,7.45%;21.77%,

46.88%,46.87%;34.20%,40.99%,47.65%。表明拔节期不灌水处理对冠层干物质量影响较大,即使复水后冠层干物质量也低于 CK。I₂、I₃ 处理也对冠层干物质量也有一定影响,但影响程度不如 I₁ 明显;I₄ 处理对冠层干物质量的影响不大。由整体上可知,I₁ 处理对冠层干物质量的影响最大,其次为 I₂、I₃ 处理,I₄ 处理的影响最小。成熟期,CK、I₁、I₂、

I₃ 和 I₄ 灌水条件下, N₀ 处理的冠层干物质质量分别较 N₁、N₂ 处理降低了 49.60%,52.35%;43.81%,40.10%;53.57%,43.40%;41.22%,50.90%;45.06%,46.52%,说明施氮对冠层干物质积累有明显的促进作用,但 N₁ 与 N₂ 处理的冠层干物质质量差

异不明显。
表 5 表明,灌水、施氮及其交互作用对灌浆期和成熟期春小麦冠层干物质质量影响极显著;此外,施氮对抽穗期冠层干物质质量影响极显著。

表 5 灌水和施氮对不同生育期春小麦冠层干物质质量影响的显著性分析
Table 5 Significance test for the effect of irrigation and nitrogen fertilization on canopy dry matter of spring wheat at different growth stages

方差来源 Source	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Tassel stage	灌浆期 Milky stage	成熟期 Mature stage
灌水水平 Irrigation level	0.191	1.329	25.986**	126.602**
施氮水平 Nitrogen level	2.274	54.818**	69.9**	28.493**
灌水×施氮水平 Irrigation×Nitrogen level	0.615	0.112	4.078**	7.012**

2.3 灌水和施氮对春小麦产量及其构成要素的影响

灌水和施氮对春小麦产量及其构成要素的影响见表 6。从表 6 可以看出,在同一施氮水平下,与 CK 相比,I₁、I₂、I₃ 和 I₄ 处理均会降低春小麦籽粒产量,其中 N₀ 水平下分别下降了 12.22%,12.79%,12.62% 和 18.86%, N₁ 水平下分别下降了 34.91%,34.02%,30.37%和 4.09%,N₂ 水平下分别下降了 50.91%,44.84%,43.35%和 2.88%。除了 N₀、N₁ 和 N₂ 条件下,I₁ 处理的春小麦籽粒产量降幅最大,之后依次为 I₂、I₃ 和 I₄ 处理。CKN₂ 组合

处理春小麦的籽粒产量最高,为 6 032 kg/hm²;其次为 I₄N₂、CKN₁ 和 I₄N₁ 组合处理,产量分别为 5 858,5 700和 5 467 kg/hm²。N₀ 条件下,不同水分处理的春小麦籽粒产量差异不显著;而在 N₁ 和 N₂ 条件下,不灌水的时期越早,其对产量的影响越大。在 I₁、I₂ 和 I₃ 条件下,随着施氮量的增加,春小麦的籽粒产量先增高后降低;在 I₄ 和 CK 条件下,春小麦的籽粒产量随施氮量的增加而上升。以上结果说明,施氮和灌水可在一定程度上促进产量提高,在拔节期、抽穗期或灌浆期不灌水情况下,增施氮肥反而会降低籽粒产量。

表 6 灌水和施氮对春小麦产量及其构成要素、水分利用效率的影响
Table 6 Effect of irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components,WUE of spring wheat at different growth stages

灌水水平 Irrigation level	施氮水平 Nitrogen level	穗粒数 Grains per spike	穗数/ m ⁻² Ears	千粒质量/g 1 000-grain weight	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²) Seeds yield	收获指数 HI	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹) WUE	灌溉水利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹) IWUE
CK	N ₀	7.15 f	593 b	45.67 abcdef	2 290 de	0.412 a	5.3 f	5.6 e
	N ₁	18.08 ab	593 b	48.60 ab	5 700 a	0.429 a	12.7 cd	15.9 bc
	N ₂	19.78 a	547 bc	48.88 a	6 032 a	0.438 a	13.8 bc	16.8 b
I ₁	N ₀	6.25 f	655 ab	44.96 cdefg	2 010 e	0.411 a	6.4 f	7.9 e
	N ₁	11.68 e	591 b	48.58 ab	3 710 bc	0.447 a	11.2 de	14.6 bcd
	N ₂	9.52 e	604 b	46.94 abcde	2 961 cd	0.466 a	10.1 e	11.6 d
I ₂	N ₀	6.92 f	589 b	44.33 defg	1 977 e	0.415 a	6.6 f	7.8 e
	N ₁	14.76 cd	548 bc	42.20 gh	3 761 bc	0.443 a	11.2 de	14.8 bcd
	N ₂	15.84 bcd	478 d	40.02 hi	3 327 bc	0.452 a	10.6 de	13.1 cd
I ₃	N ₀	5.85 f	711 a	43.99 efg	2 001 e	0.395 a	6.3 f	7.9 e
	N ₁	13.91 d	587 b	44.30 fgh	3 969 b	0.413 a	11.5 cde	15.6 bc
	N ₂	17.06 bc	482 d	37.72 i	3 417 bc	0.435 a	10.0 e	13.4 cd
I ₄	N ₀	7.12 f	575 bc	45.49 bcdef	1 858 e	0.428 a	5.7 f	8.2 e
	N ₁	16.01 bcd	644 ab	47.99 abc	5 467 a	0.442 a	15.7 ab	20.1 a
	N ₂	19.53 a	599 b	47.40 abcd	5 858 a	0.455 a	17.2 a	21.7 a

灌水和施氮均会影响产量的形成,但是不同灌水和施氮对产量构成要素的影响不同。从表 6 可以看出,同一施氮水平下,与 CK 相比,不同时期(拔节

期、抽穗期、灌浆期和成熟期)不灌水均会降低穗粒数,但降低的幅度不同,其中在 N₀ 水平下,与 CK 相比,I₁、I₂、I₃ 和 I₄ 处理穗粒数分别下降了 12.59%,

3.22%,18.18%和0.42%, N_1 水平下穗粒数分别下降了35.40%,18.36%,23.06%和11.45%, N_2 水平下穗粒数分别下降了51.87%,19.82%,13.75%和1.26%。 I_1 条件下,小麦穗粒数随着施氮量的增加先升高后降低;其他灌水条件下穗粒数均随施氮量的增加而上升。穗粒数最多的组合处理为CK N_2 ,其次为 I_4N_2 组合处理。CK、 I_1 、 I_2 、 I_3 条件下,随着施氮量的增加,穗数呈减小的趋势;而在 I_4 条件下,穗数随施氮量的增加呈现先增加后降低趋势。在同一施氮条件下,不同生育期不灌水均可降低春小麦的千粒质量,其中 N_0 和 N_2 条件下,各灌水处理千粒质量由低到高依次为 $I_3<I_2<I_1<I_4<CK$;而 N_1 条件下,各灌水处理则为 $I_2<I_3<I_4<I_1<CK$ 。说明 I_2 或 I_3 处理对千粒质量的影响更大,其次为 I_1 或 I_4 处理。CK条件下,春小麦千粒质量随施氮量增加而上升; I_2 条件下,随着施氮量的增加,千粒质量有降低的趋势;而在 I_1 、 I_3 、 I_4 条件

表 7 灌水和施氮对春小麦产量及其构成要素、水分利用效率影响的显著性分析

Table 7 Significance test for the effect of irrigation at different growth stages and nitrogen fertilization on yield and yield components,WUE of spring wheat

方差来源 Source	穗粒数 Grains per spike	穗数 Ears	千粒质量 1 000-grain weight	籽粒产量 Seeds yield	收获指数 HI	水分利 用效率 WUE	灌溉水利用 效率 IWUE
灌水水平 Irrigation level	24.371**	1.729	34.321**	55.900**	3.124	21.514**	19.153**
施氮水平 Nitrogen level	122.749**	35.091**	1.684	54.229**	6.117	55.603**	58.141**
灌水×施氮水平 Irrigation×Nitrogen	11.068**	2.884*	5.718**	6.250**	1.697	4.788**	4.227**

2.4 灌水和施氮对春小麦水分利用效率的影响

灌水和施氮对春小麦 WUE 及 IWUE 的影响见表 6。从表 6 可以看出,灌水和施氮对春小麦 WUE、IWUE 的影响基本一致。施氮处理(N_1 、 N_2)的 WUE 和 IWUE 均显著高于不施氮处理(N_0),说明施氮可在一定程度上提高作物的 WUE 和 IWUE。在 N_0 条件下,不同水分处理 WUE 和 IWUE 差异均不显著,其中以 CK 的 WUE 和 IWUE 最低,分别为 5.3 和 5.6 kg/(hm²·mm);在 N_1 和 N_2 条件下,随着不灌水时期的延后, I_1 、 I_2 、 I_3 处理 WUE 和 IWUE 与 CK 差异不显著,但 I_4 处理的 WUE 和 IWUE 均显著高于 CK、 I_1 、 I_2 和 I_3 。WUE 和 IWUE 最高的处理为 I_4N_2 组合处理,其值分别为 17.2 和 21.7 kg/(hm²·mm)。

从表 7 可以看出,灌水、施氮及其交互作用对 WUE 和 IWUE 的影响极显著。

3 讨论与结论

小麦在不同的生育期对土壤水分状况和施氮均

下,随着施氮量的增加千粒质量先升高后降低,说明灌水和施氮对千粒质量的影响存在一定的交互作用。从产量构成的 3 个要素来看,穗数和千粒质量变化幅度较小,而穗粒数变化幅度较大,对产量差异的贡献更大。

由表 6 可知,各处理收获指数为 0.395~0.466,且相互间差异不显著。同一施氮水平下,以 I_3 处理的收获指数平均值最小,其次为 CK。 N_0 、 N_1 和 N_2 处理的收获指数平均值分别为 0.412,0.435 和 0.449。以上结果说明,灌浆期不灌水及整个生育期充分灌水均不利于冠层干物质向籽粒中转移,增施氮肥可提高春小麦的收获指数。

从表 7 可以看出,灌水对穗粒数、千粒质量、籽粒产量影响极显著,而施氮对穗粒数、穗数、籽粒产量影响极显著,灌水和施氮交互作用对穗粒数、千粒质量、籽粒产量影响极显著。

有不同的要求。有学者认为,作物一般在苗期需水量较小,对土壤水分的亏缺不敏感,在该生育期对小麦进行水分胁迫具有明显的节水潜力^[11]。而在其他生育期,特别是在拔节期水分和氮素亏缺会使小麦成熟期的产量降低^[12]。本研究调查发现,在甘肃河西地区,在降水量很小的情况下,灌溉是保证农作物生长的主要水分来源,由于冬季农田贮水灌溉,第 2 年春季春小麦苗期土壤水分比较充足,不灌溉对春小麦幼苗生长不会产生很大影响。故本研究未对苗期春小麦生长和水分利用进行研究。本研究中,在拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期不灌水,均会对春小麦的冠层干物质量和籽粒产量造成不利影响,其中拔节期不灌水处理对春小麦影响最大,成熟期不灌水处理对春小麦影响最小。拔节期不灌水处理(I_1)的春小麦株高、叶片发育明显减缓,影响了总的光合作用,故对其冠层干物质量和籽粒产量影响较大。本研究中,不施氮明显抑制了春小麦株高的生长,在缺少灌水情况下,不施氮肥对株高的抑制作用更为明显;增施氮肥有利于提高 LAI;在拔节期或抽

穗期不灌水时,施氮可以提高 LAI;充分灌水时(CK),施氮可减缓叶片的变黄过程;施氮对冠层干物质质量有明显的促进作用。

小麦的产量及其构成要素与土壤水分状况和施氮情况有很大关系。据寇雯萍等^[13]在甘肃武威进行的春小麦灌溉试验表明,苗期不灌水和苗期+灌浆期不灌水对春小麦的产量影响最大,其次为抽穗期不灌水、拔节期不灌水和灌浆期不灌水;施氮对不同生育期灌水的籽粒产量、穗粒数和有效小穗数均有显著的促进作用。本研究结果表明,拔节期不灌水处理的籽粒产量和冠层干物质质量降幅最大,之后依次为抽穗期、灌浆期和成熟期不灌水处理;施氮不仅对籽粒产量和穗粒数有明显的促进作用,还可以提高小麦的收获指数。李科江等^[14]认为,小麦的单位面积穗数是影响产量的主要原因,随着穗密度增大,千粒质量逐渐降低;随着施氮量增加,千粒质量下降。本研究中,穗粒数是造成籽粒产量差异的最主要原因,各处理穗数差异不大,可能与春小麦分蘖能力差有关;高志红等^[15]研究认为,水分胁迫对穗粒数和千粒质量的影响为负效应,水分胁迫对穗粒数的影响更显著,造成产量明显下降。这与本试验结果相一致。

雷艳等^[16]认为,水分利用效率随施氮量的增加而提高,施氮对水分利用效率有促进作用。郑成岩等^[17]研究表明,在土壤水分含量较低条件下,增施氮肥有利于提高水分利用效率。本研究结果表明,成熟期不灌水(I₄)和充分灌水条件下(CK),春小麦 WUE 和 IWUE 随施氮量的增加而升高;拔节期、抽穗期、灌浆期不灌水条件下,春小麦 WUE 和 IWUE 均随着施氮量的增加而呈现出先升高后降低的趋势。

综合以上结果,在甘肃河西地区传统灌溉条件下,在成熟期减少春小麦灌水次数对籽粒产量影响较小,而在其他生育期不灌水对籽粒产量的影响较大。此外,本研究只探讨了在生育期内灌水和施氮对春小麦生长、产量和水分利用等指标的影响,对于本研究确定的不同生育期的灌水量和施氮量是否最适宜未做深入分析,同时对于灌水时间的选择也有一定的局限性。故在减少灌水次数后,制定更科学的灌水方案以及与之相对应的施氮决策还有待进一步研究。

[参考文献]

[1] 栗晓玲,康绍忠.石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用

[J]. 农业工程学报,2009,25(11):128-132.
 Su X L,Kang S Z. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(11):128-132. (in Chinese)
 [2] 刘 斌.河西地区率先建设节水型社会的探讨 [J]. 中国水利,2004,55(10):45-47.
 Liu B. Debates on pilot promotion of water-saving society in the Hexi area [J]. China Water Resources,2004,55(10):45-47. (in Chinese)
 [3] 陈元芳,梁忠民,董增川,等.甘肃河西区出山径流统计特性分析与预测 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2001,29(6):83-86.
 Chen Y F,Liang Z M,Dong Z C,et al. Statistic characteristics analysis and prediction for runoff from mountain-pass stations in Hexi Area of Gansu Province [J]. Journal of Hohai University:Natural Science Edition,2001,29(6):83-86. (in Chinese)
 [4] Fereres E,Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use [J]. Journal of Experimental Botany,2007,58(2):147-159.
 [5] Paolo E D,Rinaldi M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment [J]. Field Crops Research,2008,105:202-210.
 [6] 李久生,李 蓓,宿梅双,等.冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应 [J]. 中国农业科学,2005,38(8):1600-1607.
 Li J S,Li B,Su M S,et al. Responses of nitrogen uptake and yield of winter wheat to nonuniformity of sprinkler fertigation [J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(8):1600-1607. (in Chinese)
 [7] 蔡焕杰,康绍忠,张振华,等.作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究 [J]. 农业工程学报,2000,16(3):24-27.
 Cai H J,Kang S Z,Zhang Z H,et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2000,16(3):24-27. (in Chinese)
 [8] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报,1998,14(4):82-87.
 Kang S Z,Shi W J,Hu X T,et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,1998,14(4):82-87. (in Chinese)
 [9] Pandey R K,Maraville J W,Admou A. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. I: Grain yield, yield components and water use efficiency [J]. European Journal of Agronomy,2001,15:93-105.
 [10] Pandey R K,Maraville J W,Chetima M M. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. II: Biomass accumulation, nitrogen uptake and water extraction [J]. European Journal of Agronomy,2001,15:106-118.
 [11] 郭相平,康绍忠,索丽生.苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究 [J]. 灌溉排水,2001,20(1):25-27.
 Guo X P,Kang S Z,Suo L S. Effects of regulated deficit irrigation on root growth in maize [J]. Irrigation and Drainage,

2001,20(1):25-27. (in Chinese)

[12] 曹翠玲,李生秀.水分胁迫和氮素有限亏缺对小麦拔节期某些生理特性的影响 [J]. 土壤通报,2003,34(6):505-509.
Cao C L,Li S X. Effect of water stress and nitrogen deficiency on some physiological characteristics and wheat yield at the jointing stage [J]. Chinese Journal of Soil Science,2003,34(6):505-509. (in Chinese)

[13] 寇雯萍,张富仓,冯磊磊,等.不同生育期灌水和施氮对河西地区春小麦生长和产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):1-6.
Kou W P,Zhang F C,Feng L L,et al. Effect of irrigation at different growth stages and nitrogen fertilization on growth and yield of spring wheat in Hexi area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2010,28(3):1-6. (in Chinese)

[14] 李科江,李保国,胡克林,等.不同水肥管理对冬小麦灌浆影响的模拟研究 [J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):449-454.
Li K J,Li B G,Hu K L,et al. Modeling kernel filling of winter wheat for optimum field management [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2004,10(5):449-454. (in Chinese)

[15] 高志红,陈晓远,刘晓英.土壤水变动对冬小麦生长产量及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报,2007,23(8):52-58.
Gao Z H,Chen X Y,Liu X Y. Effects of fluctuated soil moisture on the growth,yield and water use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(8):52-58. (in Chinese)

[16] 雷 艳,张富仓,寇雯萍,等.不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(5):168-174.
Lei Y,Zhang F C,Kou W P,et al. Effect of water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition,2010,38(5):168-174. (in Chinese)

[17] 郑成岩,于振文,张永丽,等.不同施氮水平下灌水量对小麦水分利用特征和产量的影响 [J]. 应用生态学报,2010,21(11):2799-2805.
Zheng C Y,Yu Z W,Zhang Y L,et al. Effects of irrigation amount on water use characteristics and grain yield of wheat under different nitrogen application rates [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(11):2799-2805. (in Chinese)

(上接第 54 页)

[19] 上海烟草(集团)公司.津巴布韦 KRK26 品种试验烟叶化学成分初步研究 [C]//全国特色优质烟叶开发工作暨烟叶生产技术研发会议材料汇编.河南许昌:全国特色优质烟叶开发工作暨烟叶生产技术研发会,2010:43-48.
Shanghai tobacco (group) company. Preliminary study on chemical content of tobacco leaves of variety test of Zimbabwe KRK26 [C]//The material of National Seminar of Chinese Characteristic Hight Quality Tobacco Leaf Development & Growing Technology. Xuchang, Henan; National Seminar of Chinese Characteristic Hight Quality Tobacco Leaf Development & Growing Technology,2010:43-48. (in Chinese)

[20] 邸慧慧,史宏志,张国显,等.豫中浓香型烟区烤烟替代品种豫烟 5 号、豫烟 7 号特性研究 [J]. 河南农业科学,2010(6):45-48.
Di H H,Shi H Z,Zhang G X,et al. Studies on characteristics of new flue-cured tobacco variety Yuyan 5 and Yuyan 7 as replacement for full aroma in middle area of Henan Province [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2010(6):45-48. (in Chinese)