

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

雷 艳,张富仓,寇雯萍,冯磊磊

(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】研究不同生育期土壤水分亏缺和施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响,探讨小麦生长的水分亏缺敏感期和合理施氮量。【方法】以冬小麦小偃 22 为试验材料,设置 4 个氮肥水平和 11 个水分亏缺处理,采用盆栽试验,研究不同生育期水分亏缺和施氮水平对冬小麦水分利用效率、产量及其构成要素的影响。【结果】不同生育期土壤水分亏缺和施氮水平对冬小麦产量和水分利用效率有一定影响。与全生育期不亏水处理相比,返青期水分亏缺处理冬小麦干物质显著降低了 7.70%,产量、水分利用效率显著增加了 4.95%和 7.56%;拔节期、抽穗期水分亏缺处理冬小麦干物质显著降低了 13.69%,15.88%,产量显著降低了 5.69%,8.06%,且对有效穗数、穗粒数也有显著降低作用;灌浆期水分亏缺对冬小麦产量影响不显著,但耗水量显著减少了 5.44%,水分利用效率显著增加了 8.02%。与全生育期不亏水处理相比,返青期+拔节期、返青期+抽穗期、返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦干物质和产量均有显著降低,其中返青期+拔节期、拔节期+抽穗期水分亏缺处理冬小麦干物质显著降低了 17.44%,17.57%,产量显著降低了 11.60%和 14.52%,水分利用效率显著降低了 8.02%和 7.56%,且对有效穗数、穗粒数也有显著降低作用。施氮对冬小麦产量和水分利用效率有显著促进作用。中氮处理(0.3 g/kg, N₂)冬小麦产量最高,耗水量较低,水分利用效率较高。【结论】冬小麦对拔节期、抽穗期、返青期+拔节期、拔节期+抽穗期水分亏缺很敏感,中氮处理具有最高的产量和较高的水分利用效率。

【关键词】 生育期;调亏灌溉;氮肥;产量;水分利用效率;冬小麦

【中图分类号】 S512.1⁺1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)05-0167-08

Effect of water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency of winter wheat

LEI Yan,ZHANG Fu-cang,KOU Wen-ping,FENG Lei-lei

(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 was to study the effect of water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency of winter wheat, and to discuss the sensitive period of water deficit and reasonable amount of nitrogen fertilizer during wheat growth. 【Method】 With Xiaoyan 22 as test material, four nitrogen fertilizer levels and eleven water deficit treatments were provided to carry out pot experiments to study the effect of water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer on yield, yield component factors and water use efficiency of winter wheat. 【Result】 There were some effects of soil water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer levels on yield and water use efficiency of winter wheat. Compared with no water deficit at whole growth stages(CK), water deficit at period of returning green significantly decreased the dry wheat matter by 7.70% and significantly increased the wheat

* [收稿日期] 2009-11-30

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879073)

[作者简介] 雷 艳(1983—),女,陕西渭南人,硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:leiyen2007@163.com

[通信作者] 张富仓(1962—),男,陕西武功人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:zhangfc@nwsuaf.edu.cn

yield and water use efficiency by 4.95% and 7.56%. Water deficit at jointing stage and tassel stage significantly reduced dry matter and yield by 13.69%, 15.88% and 5.69%, 8.06%, respectively. Moreover, it significantly reduced spikelet bearing number and grain number per spike, too. No significant yield reduction was found when water deficit was imposed at milky stage, but water consumption was reduced significantly by 5.44%, and the water use efficiency was significantly increased by 8.02%. Compared with CK, water deficit at seedling establishment + jointing stage, seedling establishment + tassel stage, seedling establishment + milky stage, jointing + tassel stage, jointing + milky stage and tassel + milky stage reduced the dry matter and the yield significantly. Winter wheat was sensitive to water deficit at turning green + jointing stage and jointing + milky stage, and its yield was reduced seriously by 11.60% and 14.52%, respectively. At the same time, water use efficiency was reduced significantly by 8.02% and 7.56%. Nitrogen fertilizer had significant promoting effect on yield and water use of winter wheat. The middle nitrogen treatment (0.3 g/kg, N_2) obtained the highest yield, the lower water consumption and the higher water use efficiency compared with the other nitrogen fertilizer treatments. 【Conclusion】 Winter wheat is sensitive to water deficit at jointing stage, tassel stage, returning green + jointing stage and jointing + milky stage, and the middle nitrogen treatment has the highest yield and higher water use efficiency.

Key words: growth stage; regulated deficit irrigation; nitrogen fertilizer; yield; water use efficiency; winter wheat

作物水肥利用率低是我国农业生产面临的重大问题。在西北旱区水资源严重缺乏条件下,如何解决有限的补充灌溉水量和养分之间的最优耦合问题,以最大限度地提高水分和养分利用效率,对我国西北旱区农业可持续发展具有重要作用。近年来,从有限水量在作物生育期最优分配角度提出的调亏灌溉技术得到了广泛的研究和应用。大量的研究表明,调亏灌溉不仅适宜于果树,也适宜于玉米、小麦、棉花、烟草等大田作物,与充分灌溉相比,调亏灌溉具有一定的节水增产功效^[1-12]。随着调亏灌溉研究的发展,国内学者开始研究调亏灌溉和施肥的交互作用。莫江华等^[13]研究表明,在较低施肥条件下,伸根期轻度水分亏缺处理(占田间持水量的 50%~60%)可明显提高烟叶产量和水分利用效率。祈有玲等^[14]研究表明,冬小麦对水分亏缺的敏感期为拔节期,其次为开花期、灌浆期和苗期,水分逆境条件下,施用氮肥对冬小麦植株生长和干物质积累及氮吸收具有明显的调节效应。但目前相关研究主要集中在单一生育期水分亏缺的水肥效应方面,缺乏多个生育期水分亏缺和施肥对作物生长和产量影响的研究。为此,本文以冬小麦小偃 22 为试验材料,设置 4 个氮肥水平和 11 个水分亏缺处理,采用盆栽试验,研究不同生育期水分亏缺和施氮水平对冬小麦产量及水分利用效率的影响,探索小麦生长的水分亏缺敏感期和合理施氮量,以期为调亏灌溉条件下作物水氮的高效利用和最优调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试冬小麦品种为小偃 22。供试土壤为西北农林科技大学节水灌溉试验站的大田耕层土壤,经自然风干、磨细过 5 mm 筛备用。土壤质地为重壤土,田间持水量(θ_F)为 24%, pH 为 8.14, 有机质 11.26 g/kg, 全氮 0.77 g/kg, 全磷 0.35 g/kg, 全钾 13.8 g/kg, 碱解氮 55.93 mg/kg, 速效磷 8.18 mg/kg, 速效钾 102.30 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2008-10—2009-06 在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室遮雨棚中进行。试验用盆上部内径 29 cm、底部内径 21.5 cm、高 29 cm, 盆底均匀分布 7 个小孔, 并铺有纱网和细砂以保证良好的通气条件。控制装土干容重为 1.30 g/cm³, 其中每盆装土 15.6 kg。

试验设不同生育期土壤水分亏缺和施氮 2 个因素。不同生育期土壤水分亏缺设 1 个生育期水分亏缺, 包括返青期(从播种后 108 d 开始亏水处理, 持续 28 d, 其他时间正常供水)、拔节期(从播种后 136 d 开始亏水处理, 持续 14 d, 其他时间正常供水)、抽穗期(从播种后 150 d 开始亏水处理, 持续 22 d, 其他时间正常供水)和灌浆期(从播种后 172 d 开始亏水处理, 持续 35 d, 其他时间正常供水), 2 个生育期水分亏缺, 包括返青期 + 拔节期、返青期 + 抽穗期、

返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期和抽穗期+灌浆期 10 个处理,另设全生育期不亏水处理作为对照(CK),共 11 个处理。生育期土壤水分处理以控制土壤含水量占田间持水量(θ_F)的百分数表示,其中不亏水处理为 65%~80% θ_F ,水分亏缺处理为 50%~65% θ_F 。氮肥选用尿素,设置 4 个氮肥水平,分别为不施氮(N_0)、低氮(0.1 g/kg, N_1)、中氮(0.3 g/kg, N_2)和高氮(0.5 g/kg, N_3)。磷肥为过磷酸钙,施入量为 0.2 g/kg。氮肥和磷肥在装盆时与土样混合均匀一次性施入。每个处理设 3 次重复,随机排列。

为保证冬小麦的正常萌发,播种前土壤灌水至田间持水量。2008-10-21 播种,待长到两叶一心时,每盆留长势均匀的植株 20 株。按照试验处理进行灌水,2009-05-25—06-05 收获。

1.3 测定项目及方法

土壤水分的测定:开始处理时,土壤含水量用三参数土壤水分测定仪测定。分 3 层测定不同深度的土壤含水量,取平均值确定土壤水分的上下限。以后的水分管理采用称质量法。当土壤含水量降至该处理水分下限时即进行灌水,用量筒精确量取所需水量,灌水至该处理水分控制上限。

干物质质量的测定:将完整植株用水浸泡、冲洗根系后,从盆中取出,用吸水纸擦干,置于烘箱中 105℃杀青 30 min,75℃恒温烘干至恒质量,再放入干燥器中冷却,用电子天平称得整株干物质质量。

产量及其构成要素的测定:以每盆 20 株统计小麦有效穗数。每盆选取 20 个麦穗,烘干脱粒后统计总穗粒数(穗粒数=总穗粒数/20)。同时测定产量,产量为收获脱粒后的籽粒干质量(g/盆)。统计千粒

质量。

耗水量:精确记录各处理的灌水量,冬小麦成熟时测定土壤含水量并折算成水量。全生育期累积灌水量与冬小麦成熟时盆中水量之差即为耗水量。水分利用效率=产量/耗水量。

1.4 数据处理

所得试验数据采用 DPS 统计分析软件处理,首先对不同处理间的指标进行方差分析;若差异显著,再进行 Duncan's 多重比较($P<0.05$ 显著水平)。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦干物质和产量的影响

单一生育期和 2 个生育期水分亏缺和施氮对冬小麦干物质和产量的影响见表 1、2。由表 1 可知,单一生育期水分亏缺、施氮水平及其交互作用对冬小麦干物质和产量影响显著。在氮肥平均条件下,与全生育期不亏水处理(CK)相比,返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期水分亏缺对冬小麦干物质的形成有显著降低作用,各生育期水分亏缺处理冬小麦干物质分别降低了 7.70%、13.69%、15.88%和 7.08%,其中拔节期、抽穗期水分亏缺处理冬小麦干物质降低更明显。随着施氮量的增加,各水分亏缺处理的冬小麦干物质均呈现先增加后降低的趋势。在氮肥平均条件下,与全生育期不亏水处理(CK)相比,灌浆期水分亏缺处理冬小麦产量虽有增加,但不显著,返青期水分亏缺处理冬小麦产量显著增加了 4.95%,而拔节期、抽穗期水分亏缺处理冬小麦产量分别显著降低了 5.69%、8.06%。施氮对冬小麦产量的影响与对干物质的影响趋势相同。

表 1 单一生育期水分亏缺和施氮对冬小麦干物质、产量及水分利用效率的影响

Table 1 Effect of water deficit at singer growth stages and nitrogen fertilizer on dry matter,yield and water use efficiency of winter wheat

水分亏缺处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen level	干物质/(g·盆 ⁻¹) Dry matter	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield	耗水量/(L·盆 ⁻¹) Water consumption	水分利用效率/ (kg·m ⁻³) WUE
全生育期不亏水 CK	N_3	119.23 b	52.10 cd	33.63 d	1.55 a
	N_2	130.04 a	53.60 bc	37.55 bc	1.43 bc
	N_1	118.64 b	50.70 cd	39.86 a	1.27 def
	N_0	80.36 g	32.90 g	29.40 e	1.12 h
	N_3	108.43 de	52.60 bcd	32.34 d	1.63 a
返青期亏水 Deficit at returning green	N_2	119.15 b	58.71 a	37.26 bc	1.58 a
	N_1	111.38 cd	53.79 bc	39.10 ab	1.38 cd
	N_0	74.78 g	33.60 g	28.28 ef	1.19 fgh
	N_3	97.28 f	47.18 e	29.06 e	1.63 a
拔节期亏水 Deficit at jointing	N_2	106.08 de	50.60 cd	36.02 c	1.41 c
	N_1	108.45 de	49.57 de	37.67 bc	1.32 cde
	N_0	75.08 g	31.20 g	27.50 ef	1.14 gh

续表 1 Continued table 1

水分亏缺处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen level	干物质/(g·盆 ⁻¹) Dry matter	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield	耗水量/(L·盆 ⁻¹) Water consumption	水分利用效率/ (kg·m ⁻³) WUE
抽穗期亏水 Deficit at tassel	N ₃	97.98 f	43.70 f	31.83 d	1.37 cd
	N ₂	104.78 e	51.20 cd	36.71 c	1.40 c
	N ₁	96.77 f	46.80 e	37.80 abc	1.24 efg
	N ₀	77.55 g	32.37 g	28.83 e	1.12 h
灌浆期亏水 Deficit at milky	N ₃	109.38 de	52.49 bcd	32.36 d	1.63 a
	N ₂	117.24 bc	55.53 b	36.47 c	1.52 ab
	N ₁	111.61 cd	52.94 bcd	37.53 bc	1.41 c
	N ₀	78.29 g	32.61 g	26.45 f	1.24 efg
显著性检验(<i>P</i> 值) Significant level (<i>P</i> value)					
水分亏缺 Water deficit		0.001 3	0.001 6	0.006 0	0.001 4
施氮水平 Nitrogen level		<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
水分亏缺×施氮水平 Water deficit×nitrogen level		0.000 4	0.014 7	0.262 1	0.124 8

注:表中数据均为 3 个重复的平均值,同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note:The data in table are the means of 3 repeated experiments. Different small letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same with below.

表 2 2 个生育期水分亏缺和施氮对冬小麦干物质、产量及水分利用效率的影响

Table 2 Effect of water deficit at two growth stages and nitrogen fertilizer on dry matter,yield and water use efficiency of winter wheat

水分亏缺处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen level	干物质/(g·盆 ⁻¹) Dry matter	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield	耗水量/(L·盆 ⁻¹) Water consumption	水分利用效率/ (kg·m ⁻³) WUE
全生育期不亏水 CK	N ₃	119.23 b	52.10 ab	33.63 ef	1.55 ab
	N ₂	130.04 a	53.60 a	37.55 abc	1.43 bcde
	N ₁	118.64 b	50.70 abc	39.86 a	1.27 fghi
	N ₀	80.36 h	32.90 h	29.40 hi	1.12 j
返青期+拔节期亏水 Deficit at returning green +jointing	N ₃	94.08 g	43.35 g	32.55 fg	1.34 defgh
	N ₂	97.80 efg	47.40 cdef	35.95 bcde	1.32 efg
	N ₁	100.58 defg	44.80 efg	38.17 ab	1.17 ij
返青期+抽穗期亏水 Deficit at returning green +tassel	N ₀	77.60 hi	31.81 h	28.80 ij	1.11 j
	N ₃	98.55 efg	47.86 cde	31.91 fgh	1.50 b
	N ₂	107.15 cd	49.83 bc	36.33 bcde	1.37 cdef
	N ₁	103.94 cdef	44.16 fg	38.65 ab	1.14 ij
返青期+灌浆期亏水 Deficit at returning green +milky	N ₀	77.86 hi	32.10 h	28.50 ij	1.13 j
	N ₃	98.38 efg	44.70 efg	30.09 ghi	1.49 bc
	N ₂	108.28 c	46.31 defg	34.89 cdef	1.33 defgh
	N ₁	105.46 cde	44.70 efg	36.45 bcde	1.23 hij
拔节期+抽穗期亏水 Deficit at jointing +tassel	N ₀	72.10 i	30.16 h	26.19 jk	1.16 ij
	N ₃	96.00 g	43.20 g	31.99 fgh	1.35 defgh
	N ₂	100.98 cdefg	43.90 g	33.50 ef	1.32 efg
	N ₁	95.35 g	43.02 g	36.91 bcd	1.17 ij
拔节期+灌浆期亏水 Deficit at jointing +milky	N ₀	77.18 hi	31.73 h	28.35 ij	1.12 j
	N ₃	97.53 fg	46.00 defg	30.08 ghi	1.54 ab
	N ₂	101.03 cdefg	49.18 bcd	33.89 def	1.46 bcd
	N ₁	100.78 cdefg	44.20 fg	35.87 bcde	1.23 ghij
抽穗期+灌浆期亏水 Deficit at tassel +milky	N ₀	73.02 hi	31.71 h	27.14 ijk	1.17 ij
	N ₃	100.15 defg	49.10 bcd	30.18 ghi	1.63 a
	N ₂	99.61 defg	47.50 cdef	34.94 cdef	1.36 defg
	N ₁	98.12 efg	47.50 cdef	35.62 bcde	1.33 defgh
	N ₀	75.04 hi	30.01 h	25.24 k	1.19 ij
显著性检验(<i>P</i> 值) Significant level (<i>P</i> value)					
水分亏缺 Water deficit		0.000 1	0.000 6	<0.000 1	0.003 8
施氮水平 Nitrogen level		<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
水分亏缺×施氮水平 Water deficit×nitrogen level		0.000 6	0.009 6	0.905 6	0.113 5

由表 2 可知,2 个生育期水分亏缺、施氮水平及其交互作用对冬小麦干物质和产量影响显著。在氮肥平均条件下,返青期+拔节期、返青期+抽穗期、返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦干物质较全生育期不亏水处理分别显著降低了 17.44%,13.55%,14.28%,17.57%,16.93%和 16.80%。随着施氮量的增加,除抽穗期+灌浆期水分亏缺处理外,其他各水分亏缺处理的冬小麦干物质均呈现先增加后降低的趋势。不同生育期水分亏缺对冬小麦产量的影响与对干物质的影响趋势相同。在氮肥平均条件下,返青期+拔节期、返青期+抽穗期、返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦产量分别较对照显著降低了11.60%,8.12%,12.39%,14.52%,9.63%和8.03%。施氮对冬小麦产量的影响与对干

物质的影响趋势相同。

2.2 不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量构成要素的影响

单一生育期和 2 个生育期水分亏缺和施氮处理对冬小麦产量构成要素的影响见表 3 和表 4。由表 3 可知,单一生育期水分亏缺、施氮水平对冬小麦有效穗数、穗粒数和千粒质量的影响显著,水分亏缺和施氮水平的交互作用对有效穗数影响显著。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期和灌浆期水分亏缺对冬小麦有效穗数的形成有补偿和促进作用;而拔节期、抽穗期水分亏缺对冬小麦有效穗数的形成有显著降低作用,2 个处理冬小麦有效穗数较对照分别降低了 6.31%和 7.58%。随着施氮量的增加,各水分处理的有效穗数呈现先增加后降低的趋势。

表 3 单一生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量构成要素的影响

Table 3 Effect of water deficit at singer growth stages and nitrogen fertilizer on yield component factors of winter wheat				
水分亏缺处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen level	有效穗数/(穗·盆 ⁻¹) Spikelet bearing number	穗粒数 Grain number per spike	千粒质量/g 1 000-grain weight
全生育期不亏水 CK	N ₃	34.67 cd	37.81 a	48.17 bcdef
	N ₂	37.67 ab	33.88 bcd	50.17 a
	N ₁	35.33 bc	32.91 cde	49.07 abcd
	N ₀	24.33 f	30.55 fgh	47.94 cdefg
	N ₃	37.33 abc	38.98 a	49.23 abcd
返青期亏水 Deficit at returning green	N ₂	39.33 a	34.68 bc	49.72 ab
	N ₁	37.00 abc	31.29 efg	47.97 cdefg
	N ₀	24.33 f	29.92 ghi	46.66 fghi
	N ₃	31.67 e	34.18 bcd	45.44 i
拔节期亏水 Deficit at jointing	N ₂	37.00 abc	32.26 def	49.04 abcd
	N ₁	32.67 de	30.37 fgh	47.21 efgh
	N ₀	22.33 f	27.58 j	46.66 fghi
	N ₃	31.33 e	33.01 cde	47.97 cdefg
抽穗期亏水 Deficit at tassal	N ₂	35.33 bc	31.43 efg	49.43 abc
	N ₁	32.67 de	30.26 fghi	48.73 abcde
	N ₀	22.67 f	28.74 hij	46.87 fghi
	N ₃	39.33 a	35.61 b	46.36 ghi
灌浆期亏水 Deficit at milky	N ₂	39.67 a	32.78 cde	48.99 abcd
	N ₁	35.67 bc	30.89 efg	47.68 defgh
	N ₀	24.00 f	28.29 ij	46.11 hi
显著性检验(P 值) Significant level (P value)				
水分亏缺 Water deficit		0.001 0	0.001 1	0.011 6
施氮水平 Nitrogen level		<0.000 1	<0.000 1	0.000 3
水分亏缺×施氮水平 Water deficit×nitrogen level		0.024 8	0.055 0	0.129 5

由表 3 可知,与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期水分亏缺对冬小麦穗粒数没有显著影响,而拔节期、抽穗期和灌浆期水分亏缺处理冬小麦穗粒数分别显著降低了 7.97%,8.67%和 5.62%。随着施氮量的增加,各水分处理

的穗粒数呈现增大的趋势。在氮肥平均条件下,返青期、拔节期、抽穗期和灌浆期水分亏缺处理冬小麦千粒质量分别较对照减少了 0.91%,3.59%,1.22%和3.19%,其中返青期、抽穗期水分亏缺对冬小麦千粒质量没有显著影响,而拔节期、灌浆期影响

显著。施氮对千粒质量的影响与对有效穗数的影响趋势相同。

由表 4 可知,2 个生育期水分亏缺、施氮水平对有效穗数、穗粒数和千粒质量影响显著,水分亏缺和施氮水平的交互作用对穗粒数和千粒质量影响显著。2 个生育期水分亏缺处理冬小麦有效穗数、穗粒数和千粒质量均低于其相应施氮水平的对照。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦有效穗数有所减少,但影响不显著;而返青期+拔节期、返青期+抽穗期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦有效穗数分别较对照降低了 8.08%,10.35%,14.14%,7.07%和 10.35%,影响显著。随着施氮量的增加,各水分处理的有效穗数呈现先增加后降低的趋势。在氮肥平

均条件下,返青期+拔节期、返青期+抽穗期、返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦穗粒数分别较对照降低了 8.80%,7.83%,4.24%,12.05%,5.36%和 10.40%。随着施氮量的增加,除拔节期+抽穗期水分亏缺处理外,其他各水分处理的穗粒数呈现增大的趋势。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期+拔节期、返青期+抽穗期和抽穗期+灌浆期水分亏缺对冬小麦千粒质量均有降低作用,但影响不显著,而返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦千粒质量显著降低了 8.86%,4.22%和 8.13%。随着施氮量的增加,除拔节期+灌浆期水分亏缺处理外,其他各水分处理的千粒质量均呈现先增加后降低的趋势。

表 4 2 个生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量构成要素的影响

Table 4 Effect of water deficit at two growth stages and nitrogen fertilizer on yield component factors of winter wheat				
水分亏缺处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen level	有效穗数/(穗·盆 ⁻¹) Spikelet bearing number	穗粒数 Grain number per spike	千粒质量/g 1 000-grain weight
全生育期不亏水 CK	N ₃	34.67 abcd	37.81 a	48.17 cdef
	N ₂	37.67 a	33.88 cde	50.17 a
	N ₁	35.33 abc	32.91 def	49.07 abc
	N ₀	24.33 j	30.55 ghij	47.94 cdef
	N ₃	31.67 defghi	35.61 bc	45.49 ij
返青期+拔节期亏水 Deficit at returning green +jointing	N ₂	35.00 abcd	31.38 fgh	49.33 abc
	N ₁	32.33 cdefgh	29.11 ijkl	48.27 cdef
	N ₀	22.33 j	27.17 mn	47.18 defgh
	N ₃	30.33 fghi	36.29 ab	46.81 efghi
	N ₂	32.67 cdefg	32.25 efg	49.26 abc
返青期+抽穗期亏水 Deficit at returning green +tassel	N ₁	32.67 cdefg	28.21 klmn	48.35 cde
	N ₀	22.67 j	27.83 lmn	47.23 defgh
	N ₃	34.33 bcde	37.03 ab	44.81 j
	N ₂	36.67 ab	32.45 defg	46.20 ghij
	N ₁	34.00 bcde	31.49 fgh	44.87 j
返青期+灌浆期亏水 Deficit at returning green +milky	N ₀	23.33 j	28.45 klmn	42.18 k
	N ₃	28.67 i	34.19 cd	46.13 ghij
	N ₂	32.67 cdefg	28.78 jklmn	48.48 bcd
	N ₁	29.33 ghi	29.00 ijklm	46.70 fghi
	N ₀	22.67 j	26.89 n	45.81 ghij
拔节期+抽穗期亏水 Deficit at jointing +tassel	N ₃	32.00 cdefgh	37.52 a	41.77 k
	N ₂	35.33 abc	31.40 fgh	45.98 ghij
	N ₁	33.00 cdef	31.22 fgh	45.67 hij
	N ₀	22.33 j	27.78 lmn	46.05 ghij
	N ₃	31.00 efghi	33.01 def	47.24 defgh
拔节期+灌浆期亏水 Deficit at jointing +milky	N ₂	33.00 cdef	30.71 ghi	49.95 ab
	N ₁	32.00 cdefgh	29.79 hijk	47.39 defg
	N ₀	22.33 j	27.60 lmn	45.94 ghij
显著性检验(P 值) Significant level (P value)				
水分亏缺 Water deficit		<0.000 1	0.000 1	<0.000 1
施氮水平 Nitrogen level		<0.000 1	<0.000 1	0.000 2
水分亏缺×施氮水平 Water deficit×nitrogen level		0.685 9	0.009 4	0.000 4

2.3 不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦水分利用效率的影响

由表1可知,单一生育期水分亏缺、施氮水平对耗水量和水分利用效率影响显著,但水分亏缺和施氮水平交互作用对耗水量和水分利用效率没有显著影响。单一生育期水分亏缺处理冬小麦耗水量在任何施氮水平下均低于对照。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期水分亏缺对冬小麦耗水量影响不显著,而拔节期、抽穗期、灌浆期水分亏缺处理冬小麦耗水量显著减少了7.27%、3.75%和5.44%。随着施氮量的增加,各水分处理的耗水量呈现先增加后降低的趋势。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,拔节期水分亏缺对冬小麦水分利用效率有所提高,但影响不显著,返青期、灌浆期水分亏缺处理冬小麦水分利用效率显著增加了7.56%和8.02%,而抽穗期水分亏缺处理冬小麦水分利用效率显著降低了4.38%。随着施氮量的增加,除抽穗期水分亏缺处理外,其他各水分处理的水分利用效率均呈增大趋势。

由表2可知,2个生育期水分亏缺、施氮水平对耗水量和水分利用效率影响显著,其交互作用对耗水量和水分利用效率没有显著影响。2个生育期水分亏缺处理冬小麦耗水量在各施氮水平下均低于其相应的对照。与全生育期不亏水处理(CK)相比,在氮肥平均条件下,返青期+拔节期、返青期+抽穗期水分亏缺对冬小麦耗水量的降低作用不显著,而返青期+灌浆期、拔节期+抽穗期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺处理冬小麦耗水量显著降低了9.14%、6.91%、9.59%和10.30%。随着施氮量的增加,各水分处理的耗水量呈现先增大后降低的趋势。与全生育期不亏水处理(CK)比较,在氮肥平均条件下,返青期+抽穗期、返青期+灌浆期、拔节期+灌浆期、抽穗期+灌浆期水分亏缺对冬小麦水分利用效率没有显著降低作用,而返青期+拔节期、拔节期+抽穗期水分亏缺处理冬小麦水分利用效率显著降低了8.02%和7.56%。随着施氮量的增加,各水分处理的水分利用效率呈现增大趋势。

3 讨 论

不同生育期水分亏缺和施氮对作物产量和水分利用效率的影响不同,氮肥水平一定的条件下,在适当的生长阶段对作物进行水分亏缺处理是调亏灌溉的关键。Turner^[15]研究指出,适当阶段的适度缺水有利于作物产量的提高。山仑等^[16]认为,在一定条

件下,中等水分亏缺不会对作物产量造成影响,但能显著提高作物水分利用效率。蔡焕杰等^[5]研究表明,作物在不同时期对缺水的敏感度不同。对于大多数作物而言,由于早期阶段植株较小,气温较低,蒸发强度小,需水量也小,作物缺水的发展速度较慢,因此调亏灌溉对作物产量的影响小;而在作物的生长中期,植株生长旺盛,需水量大,作物缺水的发展速度较快,此时不适于进行调亏灌溉。

本研究结果表明,返青期水分亏缺时,冬小麦产量和水分利用效率显著增加,而拔节期、抽穗期水分亏缺冬小麦干物质、产量均显著降低,灌浆期水分亏缺对产量影响不显著,但耗水量显著减少,水分利用效率显著提高。冬小麦对返青期+拔节期、拔节期+抽穗期水分亏缺很敏感,这2个时段水分亏缺会显著减产,从而导致水分利用效率显著降低。返青期+拔节期、拔节期+抽穗期均为2个连续的生育期水分亏缺处理,且拔节期、抽穗期处于冬小麦生长中期阶段,进一步说明调亏灌溉阶段的重要性,而且水分亏缺历时要适度,水分亏缺历时过长会使复水无法起到补偿效应,导致产量下降^[17]。随着施氮量的增加,除抽穗期+灌浆期水分亏缺处理外,其他各水分处理的产量呈现先增加后降低的趋势,且施氮与不施氮产量差异显著,说明合理施肥与调亏灌溉相结合可显著提高作物产量及其水分利用效率,也提示氮的增产效应与土壤水分密切相关。

刘晓宏等^[18]研究表明,在不同土壤水分条件下,春小麦地上部分干质量和籽粒的水分利用效率随施氮量的增加而增加,且以水分充足条件下水分利用效率随施氮量的增加最为显著。本研究结果表明,在土壤水分亏缺条件下,随施氮量的增加,水分利用效率呈现增大的趋势,说明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积极的促进作用。冬小麦的生长不仅与水分及氮素有很大关系,还与环境条件有关,本试验是在盆栽条件下完成,在大田中小麦的水氮调亏试验结论还需进一步深入研究。

4 结 论

(1)冬小麦对拔节期、抽穗期水分亏缺很敏感。返青期水分亏缺处理冬小麦干物质显著降低了7.70%,但产量、水分利用效率显著增加了4.95%和7.56%。拔节期、抽穗期水分亏缺对冬小麦有效穗数、穗粒数形成有显著降低作用,且干物质显著降低了13.69%、15.88%,产量显著降低了5.69%、8.06%。灌浆期水分亏缺对冬小麦产量影响不显

著,但耗水量显著减少了 5.44%,水分利用效率显著增加了 8.02%。返青期+拔节期、拔节期+抽穗期水分亏缺对冬小麦有效穗数、穗粒数形成有显著降低作用,且干物质显著降低了 17.44%,17.57%,产量显著降低了 11.60%,14.52%,进而引起水分利用效率显著降低了 8.02%,7.56%。

(2)中氮处理(N_2)可获得最高的产量、较高的水分利用效率和最佳的产量构成要素。随着施氮量的增加,除抽穗期+灌浆期水分亏缺处理外,其他各水分处理的干物质、产量均呈现先增大后降低的趋势,其中 N_2 处理产量最高;各水分处理的耗水量呈现先增大后降低的趋势,表现为 $N_1 > N_2 > N_3 > N_0$;除抽穗期水分亏缺处理外,其他各水分处理的水分利用效率呈现增大趋势。 N_2 处理在获得最高产量的同时,耗水量低,且能保证较高的水分利用效率。随着施氮量的增加,各水分处理的有效穗数呈现先增大后降低的趋势, N_2 处理有效穗数最多;除拔节期+抽穗期水分亏缺处理外,其他各水分处理的穗粒数呈现增大趋势;除拔节期+灌浆期水分亏缺处理外,其他各水分处理的千粒质量呈现先增大后降低的趋势, N_2 处理冬小麦千粒质量最大。 N_2 处理冬小麦的产量构成要素最佳。

参考文献

- [1] Elias F, Maria A S. Deficit irrigation for reducing agricultural water use [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 147-159.
- [2] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 203-216.
- [3] 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)
- [4] 胡笑涛, 梁宗锁, 康绍忠, 等. 模拟调亏灌溉对玉米根系生长及水分利用效率的影响 [J]. *灌溉排水*, 1998, 17(2): 11-15.
Hu X T, Liang Z S, Kang S Z, et al. Effect of simulated regulated deficit irrigation on root growth and water use efficiency in maize [J]. *Irrigation and Drainage*, 1998, 17(2): 11-15. (in Chinese)
- [5] 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-
- [6] 郭相平, 刘才良, 邵孝侯. 调亏灌溉对玉米需水规律和水分生产效率的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(3): 93-95.
Guo X P, Liu C L, Shao X H. The effect of regulated deficit irrigation on water consumption regulation and water production efficiency of maize [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 1999, 17(3): 93-95. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 孟兆江, 贾大林, 刘安能, 等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 66-69.
Meng Z J, Jia D L, Liu A N, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water use efficiency of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 66-69. (in Chinese)
- [9] 史文娟, 康绍忠, 宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3): 91-95.
Shi W J, Kang S Z, Song X Y. Physiology of growth control of cotton under regulated deficit irrigation [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 91-95. (in Chinese)
- [10] 王密侠, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 玉米调亏灌溉节水调控机理研究 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(12): 87-89.
Wang M X, Kang S Z, Cai H J, et al. Study on the mechanism of saving water of regulated deficit irrigation in maize [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2004, 32(12): 87-89. (in Chinese)
- [11] 阿吉艾克拜尔, 邵孝侯, 钟 华, 等. 调亏灌溉及其对烟草生长发育的影响研究 [J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(2): 171-174.
Hajiakbar, Shao X H, Zhong H, et al. Regulated deficit irrigation and its effects on growth of tobacco [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2006, 34(2): 171-174. (in Chinese)
- [12] 张 步, 李凤民, 齐广平. 调亏灌溉对于干旱环境下春小麦产量与水分利用效率的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 58-62.
Zhang B, Li F M, Qi G P. Effects of regulated deficit irrigation on grain yield of spring wheat in an arid environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 58-62. (in Chinese)
- [13] 莫江华, 李伏生, 李桂湘, 等. 不同生育期适度缺水对烤烟生长、水分利用和氮钾含量的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1071-1076.
Mo J H, Li F S, Li G X, et al. Effects of moderate water deficit during different growth stages on growth, water use and N and K contents of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1071-1076. (in Chinese)