

水氮互作对石羊河流域春小麦群体 产量和水氮利用的影响

刘小刚,张富仓,田育丰,李志军

(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】探讨西北旱区春小麦最佳的水氮耦合形式。【方法】在甘肃石羊河流域绿洲区采用田间试验,研究不同生育阶段的水量分配以及氮肥处理对春小麦群体产量和水氮利用的影响。【结果】施氮量、拔节期和抽穗期灌水对干旱区春小麦的产量影响显著;施氮量 168 kg/hm^2 ,并于拔节期灌水 90 mm 、抽穗期灌水 70 mm ,小麦可获得较高的籽粒产量。水氮对小麦地上干物质累积量的影响与对籽粒产量的影响相似,但抽穗期灌水对地上干物质累积量影响不显著。在施氮量 224 kg/hm^2 、抽穗期和灌浆期灌水均为 50 mm 的条件下,小麦可获得较高的收获指数。在生产中考虑提高小麦收获指数时,首先应保证较高的籽粒产量。分蘖期和灌浆期灌水均为 30 mm 时,小麦的水分利用效率高达 2.424 kg/m^3 ,但产量降低约 45% 。施氮量对小麦地上干物质和籽粒氮素累积量影响显著;拔节期灌水 90 mm 、施氮量 168 kg/hm^2 时,小麦籽粒的氮素累积量最大。【结论】石羊河流域春小麦最优灌水施氮模式为:施氮量 168 kg/hm^2 ,全生育期灌水 4 次,拔节期灌水 90 mm ,分蘖期、抽穗期、灌浆期均灌水 60 mm 。

【关键词】 春小麦;水氮互作;收获指数;水分利用效率;氮素累积;小麦产量;石羊河流域

【中图分类号】 S512.1⁺20.62;S512.1⁺20.71 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2009)03-0107-07

Interactive impact of water and nitrogen on group yield of spring wheat and use of water and nitrogen in Shiyang River Basin

LIU Xiao-gang, ZHANG Fu-cang, TIAN Yu-feng, LI Zhi-jun

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

Abstract: 【Objective】 This study was to explore the best coupling form of water and nitrogen in arid areas of northwest China. 【Method】 Field experiment was conducted in the oasis region of Shiyang River basin. The interactive impact of water and nitrogen on group yield of spring wheat and use of water and nitrogen was investigated. 【Result】 Nitrogen rate and irrigation in jointing and heading stage impacted on spring wheat yield remarkably. With nitrogen rate (168 kg/hm^2), irrigation (90 mm) in jointing stage, and irrigation (70 mm) in heading stage, spring wheat production was higher. The impact of water and nitrogen on dry matter accumulation was similar to the impact on grain yield, but the impact of irrigation in heading stage on dry matter accumulation was not distinct. Higher harvest index could be got with nitrogen rate (224 kg/hm^2), irrigation (50 mm) in heading and filling stage. Higher grain yield should be guaranteed, when enhancing the harvest index. WUE achieved 2.424 kg/m^3 and yield reduced by 45% when the irrigation in tillering and filling stage both were 30 mm . The impact of nitrogen rate on nitrogen accumulation of grain yield and dry matter was significant; nitrogen accumulation of grain came to maximum when nitrogen

* 【收稿日期】 2008-05-06

【基金项目】 国家自然科学基金(50579066, 50879073);高等学校学科创新引智计划项目(111-2-16)

【作者简介】 刘小刚(1977—),男,甘肃镇原人,在读博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liuxiaogang888@tom.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新技术研究。E-mail: zhangfucang@tom.com

rate (168 kg/hm²) and irrigation (90 mm) were applied.【Conclusion】 The optimal model of irrigation and nitrogen rate of spring wheat in Shiyang River Basin presents nitrogen rate 168 kg/hm²,irrigation 90 mm in jointing stage and irrigation 60 mm in tillering,heading and filling stage.

Key words: spring wheat;interactive impact of water and nitrogen;harvest index;water use efficiency;nitrogen accumulation;wheat yield;Shiyang River Basin

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河流域中人口最多、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重、水资源对经济社会发展制约性最强的区域。本地区农业用水量占水资源利用总量的 70%~90%^[1],农业灌溉用水和供水矛盾突出。地面灌溉是当地采用的最广泛、最主要的一种灌水方法,大水漫灌现象比较普遍,不但造成水肥资源的严重浪费,并且引发了系列农田环境问题^[2-6]。如何使作物在不减产的条件下减少灌溉定额,提高灌溉效益,已成为石羊河流域农业发展最紧迫的任务。当地虽已进行了大量节水灌溉新技术试验研究,并取得了一定成果^[7-10],但没有很好地将水和肥结合起来。肥水是影响旱地农业生产及作物生长最主要的两大因素,如何提高其利用效率以促进作物的生长发育,是目前研究的热点。国内外研究证明,提高旱地水肥利用效率的最佳途径是水肥的高效配合^[11-14]。但目前许多研究只注重水肥在量上的配合,而很少考虑水肥在不同生育阶段分配对作物生长发育的影响^[15-17]。本试验研究了不同生育阶段的水量分配及氮肥处理对春小麦群体产量和水氮利用的效应,以期探明影响春小麦产量的最主要灌水时期和最佳的水氮耦合形式,从而为石羊河流域提高水肥利用效率、建立水肥耦合模型提供理论依

据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2007-04-07 在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站(37°57′20″N,102°50′50″E)进行。试验田位于腾格里沙漠边缘,为典型的内陆荒漠气候区,地处黄羊河、杂木河、清源灌区交汇带,海拔 1 581 m,多年平均降水量仅 164.4 mm 左右。土壤质地为灰钙质轻砂壤土,根层土壤干容重 1.32 g/cm³,田间持水率 36.58%(体积含水率),地下水埋深达 25~30 m。土壤肥力水平较低,速效磷含量为 5~8 mg/kg,有机质含量为 4~8 g/kg,土壤 pH 值约 8.2,矿化度 0.71 g/L,土壤速效性盐离子含量为 1.2~5.6 g/kg。灌溉水源为地下水。

供试小麦品种为当地常规品种永良 15 号。试验设施氮量和分蘖期、拔节期、抽穗期及灌浆期的灌水水量共 5 个因素,其中施氮量设高氮(224 kg/hm²)、中氮(168 kg/hm²)、低氮(112 kg/hm²)、特低氮(56 kg/hm²)4 个水平;灌水定额设 90,70,50 和 30 mm 4 个水平。各因素之间为正交组合 L₁₆(4⁵),试验设计如表 1 所示。

表 1 石羊河流域春小麦水氮互作 L₁₆(4⁵)正交试验设计因素与水平

Table 1 L₁₆(4⁵) factors and levels of orthogonal design of interactive impact of water and nitrogen on spring wheat in Shiyang River Basin

处理 Treatment	因素 Factor					处理 Treatment	因素 Factor				
	施氮量/ (kg · hm ⁻¹) Nitrogen rate	灌水定额/mm Irrigation amount					施氮量/ (kg · hm ⁻¹) Nitrogen rate	灌水定额/mm Irrigation amount			
		分蘖期 Tiller	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling			分蘖期 Tiller	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling
1	224	90	90	90	90	9	112	90	50	30	70
2	224	70	70	70	70	10	112	70	30	50	90
3	224	50	50	50	50	11	112	50	90	70	30
4	224	30	30	30	30	12	112	30	70	90	50
5	168	90	70	50	30	13	56	90	30	70	50
6	168	70	90	30	50	14	56	70	50	90	30
7	168	50	30	90	70	15	56	50	70	30	90
8	168	30	50	70	90	16	56	30	90	50	70

试验每个处理重复 3 次,合计 48 个小区。小区为东西方向,四周开阔,小区面积 15 m²。氮肥选用尿素,播前一次施入。磷肥选用过磷酸钙,作为底肥

深翻土地前一次均匀撒施,施磷量为 150 kg/hm² 五氧化二磷。04-04 播种,07-15 收获。灌水水量用低压管出水口处精确水表测量。春小麦整个生育期降

雨量、参考作物的蒸发蒸腾量及灌水时间见图 1。

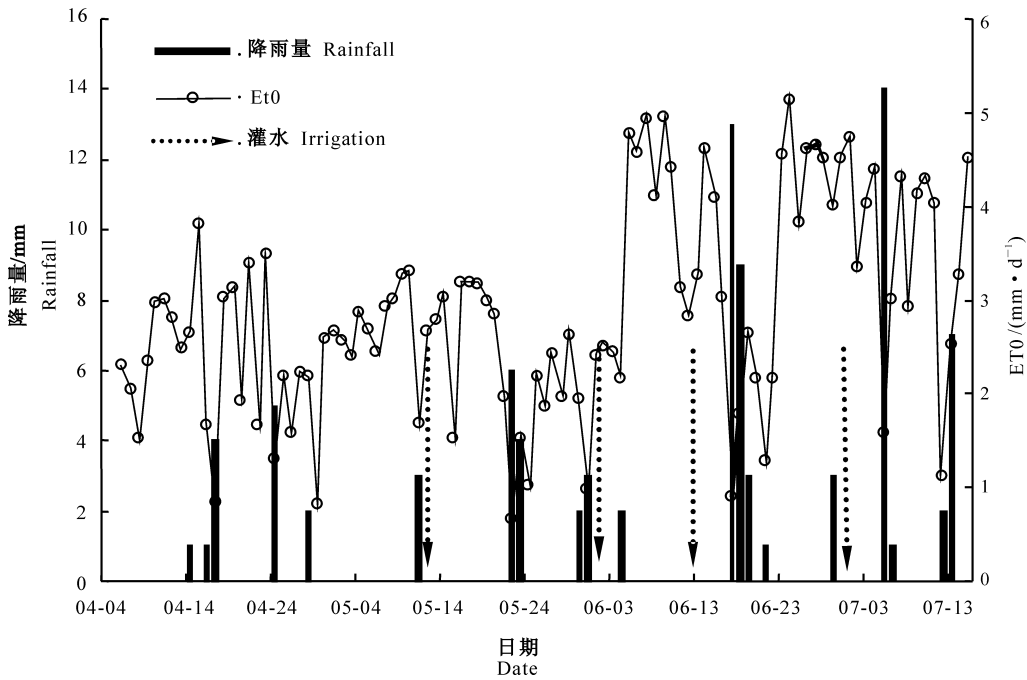


图 1 试验期间的降雨量、参考作物蒸发蒸腾量和灌水时间

Fig. 1 Rainfall,reference crop evapotranspiration (ET0) and irrigation time in growth period

1.2 测定项目与方法

收获时每小区随机选取 5 m² 的春小麦脱粒称质量,70 ℃烘干至恒定质量,折算产量。植物样 105 ℃杀青 30 min,60 ℃烘至恒定质量,测定地上部分干质量。植株和籽粒经烘干磨碎后进行全氮测定,全氮测定用开氏(Kjedahl)法^[18]。氮素累积量=全氮含量×质量,收获指数=产量/单位面积干物质累积

量,水分利用效率=产量/单位面积灌水量。

2 结果与分析

不同水氮组合对春小麦产量、干物质累积量、收获指数、水分利用效率及其地上部分植株氮素累积量和籽粒氮素累积量的影响结果见表 2,其极差和方差分析结果见表 3 和表 4。

表 2 水氮互作对春小麦产量及水氮利用的影响

Table 2 Interactive impact of water and nitrogen on yield and use of water and nitrogen

处理 Treatment	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	干物质累积量/ (kg·hm ⁻²) Dry matter	收获指数 Harvest index	水分利用效率/ (kg·m ⁻³) WUE	氮素累积量/ (kg·hm ⁻²) Total nitrogen	籽粒氮素累积/ (kg·hm ⁻²) Grain nitrogen
1	5 447.70	13 510.62	0.403	1.513	229.25	134.08
2	4 956.30	11 685.25	0.424	1.770	217.35	120.35
3	3 590.40	7 033.89	0.510	1.795	124.07	87.48
4	2 956.20	6 554.67	0.451	2.464	120.30	74.84
5	4 635.90	10 023.99	0.462	1.932	163.05	114.12
6	4 887.90	11 150.88	0.438	2.037	179.24	120.50
7	4 349.70	11 060.88	0.390	1.812	174.03	105.62
8	4 556.70	10 766.04	0.423	1.899	173.65	109.68
9	3 960.90	8 990.92	0.441	1.650	128.76	92.67
10	3 663.00	8 030.97	0.456	1.526	120.24	84.53
11	4 723.20	9 812.83	0.481	1.968	134.37	108.38
12	4 117.50	8 955.56	0.460	1.716	122.63	95.83
13	3 560.40	7 427.78	0.479	1.484	80.47	60.21
14	3 811.50	8 053.94	0.473	1.588	97.40	62.34
15	4 068.90	8 759.30	0.465	1.695	101.84	65.97
16	4 272.30	8 745.20	0.489	1.780	112.23	83.23

注:表中数据为 3 个重复的平均值。Note: The data in table were the averages of 3 repeated experiments.

2.1 水氮互作对春小麦产量的影响

由表 2 可知,处理 1 的小麦产量最高,处理 2 次之,处理 4 的最低,仅为处理 1 的 54.27%。在氮肥充足(均为高氮处理)的条件下,分析前 4 个处理的小麦产量可知,灌水量与产量呈正相关,说明灌水太少降低了土壤养分的有效性,也影响小麦对养分的吸收、转运、转化和同化,表明灌水是提高和保证旱区小麦产量的最主要因素。当全生育期灌水量均为 240 mm,但在各生育期的水量分配不同时,各处理小麦产量也不相同,其中中氮水平处理的产量均值最高,为 4 607.550 kg/hm²,低氮次之,特低氮处理的产量最低,占中氮水平产量的 85.3%,说明小麦在不同生育期对水分的敏感程度不同。统计分析结果(表 3,表 4)表明,各因素对小麦产量影响的大小表现为:拔节期灌水>施氮量>抽穗期灌水>分蘖期灌水>灌浆期灌水,其中拔节期灌水对产量的影响达到极显著水平,抽穗期灌水和施氮量达到显著水平,其余因素对产量的影响不显著。计算各因素相同水平下产量的平均值,结合方差分析结果可知最优组合为:施氮量 168 kg/hm²,拔节期和抽穗期灌水量分别为 90 mm 和 70 mm。

表 3 春小麦群体产量和水氮利用的极差分析

因素 Factor	产量 Yield	干物质 Dry matter	收获指数 Harvest index	水分利用效率 WUE	氮素累积量 Total nitrogen	籽粒氮素累积量 Grain nitrogen
施氮量 Nitrogen rate	679.275	2 526.389	0.048	0.283	74.757	36.250
分蘖期灌水 Tiller irrigation	425.440	1 232.958	0.015	0.320	18.181	9.376
拔节期灌水 Jointing irrigation	1 200.340	2 513.807	0.018	0.088	40.012	30.247
抽穗期灌水 Heading irrigation	480.565	1 959.235	0.048	0.304	25.929	10.973
灌浆期灌水 Filling irrigation	402.265	1 655.375	0.036	0.330	31.490	10.548

2.3 水氮互作对春小麦收获指数的影响

收获指数综合反映地上生物产量向籽粒产量的分配效率。在所有处理中,处理 3 的小麦收获指数最大,为 0.510,分别是处理 1 和处理 7 的 1.27 和 1.31 倍,说明高水高氮处理的小麦生物学产量虽然较高,但没有很好地向籽粒转移,因此收获指数相对较低。前面分析可知,拔节期的灌水量对小麦产量影响极显著,而处理 7 由于在分蘖期和拔节期灌水量较小,而在抽穗期和灌浆期灌水较多,因此降低了籽粒产量,从而降低了收获指数。统计分析结果(表 3 和表 4)显示,各因素对小麦收获指数的影响大小依次为:施氮量>抽穗期灌水>灌浆期灌水>拔节期灌水>分蘖期灌水,其中施氮量、抽穗期灌水和灌浆期灌水对收获指数影响显著,其余因素对其影响不显著。结合对施氮量、抽穗期灌水、灌浆期灌水分

2.2 水氮互作对春小麦干物质累积量的影响

干物质生产是作物产量形成的基础。由表 2 可知,处理 1 的小麦干物质累积量最大,处理 4 的干物质累积量最小,处理 1 是处理 4 的 2.06 倍;在高氮条件下,灌溉定额由 90 mm 降为 30 mm,其干物质累积量下降 45.7%。说明在氮肥供应充足的条件下,土壤水分严重亏缺抑制了小麦干物质的累积。在灌水定额为 240 mm 时,中氮处理的小麦干物质累积量最大,低氮处理的较小,特低氮处理的最小。当灌溉定额和施氮量相同、而每个生育阶段的灌水定额不同时,春小麦干物质累积量各有差异,其中中氮处理的偏差最小,特低氮处理的偏差最大,这说明水氮对干物质累积有明显的交互作用。统计结果(表 3 和表 4)显示,各因素对小麦干物质积累的影响大小依次为:施氮量>拔节期灌水>抽穗期灌水>灌浆期灌水>分蘖期灌水,其中施氮量和拔节期灌水量对干物质累积的影响达显著水平,其余因素对其影响不显著。结合对影响显著因素不同水平多重比较的结果可知,获得最大干物质累积量应采用中氮(168 kg/hm²)和拔节期高水(90 mm)的处理组合。

别进行不同水平上的多重比较可知,欲获得最大收获指数的处理组合应为:施氮量 224 kg/hm²,抽穗期和灌浆期分别灌水 50 mm。

2.4 水氮互作对春小麦水分利用效率的影响

水分利用效率能综合反映耗水量与籽粒产量的相互关系。由表 2 可知,处理 4 的小麦产量和干物质累积量最小,但单位灌水量获得的经济产量最大,为 2.464 kg/m³,是处理 1 和处理 14 的 1.63 和 1.61 倍,这说明在高氮条件下,低水处理更有利于提高小麦的水分利用效率;而处理 1 由于水氮充足,导致小麦营养生长过旺,降低了产量的形成,从而降低了水分利用效率。由于施氮量和拔节期灌水对小麦产量影响显著,特低施氮和拔节期低水处理导致了产量和水分利用效率较低。在灌溉定额均为 240 mm 时,中氮处理的小麦平均水分利用效率为 1.920

kg/m³,是低氮和特低氮处理的 1.12 和 1.17 倍。高氮处理的小麦水分利用效率均值较中氮处理的低 0.034 kg/m³,这主要是由处理 1 的水分利用效率过低所致。统计结果(表 3 和表 4)表明,各因素对小麦水分利用效率的影响程度依次为:灌浆期灌水>分蘖期灌水>抽穗期灌水>施氮量>拔节期灌水,

这说明在干旱地区适量的灌水比施氮更有利于提高水分利用效率,其中施氮量、分蘖期灌水和灌浆期灌水对水分利用效率的影响达显著水平,其余因素影响不显著。对达到显著水平的因素进行多重比较可知,获得最大水分利用效率的处理组合应为:施氮量 168 kg/hm²,拔节期灌水 30 mm,灌浆期灌水 30 mm。

表 4 春小麦群体产量和水氮利用的方差分析

Table 4 Intuitive analysis of yield and the use of water and nitrogen

项目 Item	方差来源 Variation source	离差 平方和 SS	自由度 DF	方差估计 MS	F	项目 Item	方差来源 Variation source	离差 平方和 SS	自由度 DF	方差估计 MS	F
产量 Yield	施氮量 Nitrogen rate	985 500	3	492 750	7.628	水分利用 效率 WUE	施氮量 Nitrogen rate	0.220	3	0.110	5.604
	分蘖期灌 水 Tiller irrigation	423 414	3	211 707	3.277		分蘖期灌 水 Tiller irrigation	0.224	3	0.112	5.690
	拔节期灌 水 Jointing irrigation	3 315 318	3	1 657 659	25.662		拔节期灌 水 Jointing irrigation	0.022	3	0.011	0.566
	抽穗期灌 水 Heading irrigation	770 905	3	385 452	5.967		抽穗期灌 水 Heading irrigation	0.193	3	0.096	4.897
	灌浆期灌 水 Filling irrigation	564 487	3	282 244	4.369		灌浆期灌 水 Filling irrigation	0.236	3	0.118	5.991
干物质 Dry matter	施氮量 Nitrogen rate	13 784 373	3	6 892 187	6.605	氮素 累积量 Nitrogen accumulation	施氮量 Nitrogen rate	16 207	3	8 104	12.820
	分蘖期灌 水 Tiller irrigation	3 699 013	3	1 849 507	1.722		分蘖期灌 水 Tiller irrigation	1 480	3	740	1.171
	拔节期灌 水 Jointing irrigation	15 743 254	3	7 871 627	7.318		拔节期灌 水 Jointing irrigation	4 051	3	2 025	3.204
	抽穗期灌 水 Heading irrigation	9 749 452	3	4 874 726	4.675		抽穗期灌 水 Heading irrigation	2 064	3	1 032	1.632
	灌浆期灌 水 Filling irrigation	9 866 020	3	4 933 010	4.707		灌浆期灌 水 Filling irrigation	3 492	3	1 746	2.762
收获指数 Harvest index	施氮量 Nitrogen rate	0.005	3	0.002	9.200	籽粒氮 素累积量 Grain nitrogen	施氮量 Nitrogen rate	4 489.673	3	2 233.980	12.690
	分蘖期灌 水 Tiller irrigation	0.001	3	0.000	1.129		分蘖期灌 水 Tiller irrigation	232.729	3	862.560	0.658
	拔节期灌 水 Jointing irrigation	0.001	3	0.000	1.183		拔节期灌 水 Jointing irrigation	2 105.957	3	237.565	5.952
	抽穗期灌 水 Heading irrigation	0.005	3	0.002	8.855		抽穗期灌 水 Heading irrigation	364.126	3	120.630	1.029
	灌浆期灌 水 Filling irrigation	0.004	3	0.002	8.400		灌浆期灌 水 Filling irrigation	337.500	3	355.575	0.954

注(Note): $F_{0.05}(3,5)=5.41,F_{0.01}(3,5)=12.06$ 。

2.5 水氮互作对春小麦植株氮素累积量的影响

表 2 结果表明,在高氮条件下,处理 1 收获时小麦植株的氮素累积量最大,是处理 3 和处理 4 的 1.85 和 1.91 倍,比处理 2 高 11.90 kg/hm²。这主要是因为低水处理和特低水处理抑制了作物生长,降低了氮素累积。在灌溉定额均为 240 mm 时,不

同施氮水平的小麦植株氮素累积均值以中氮处理最大,低氮处理次之,特低氮处理最小。由统计分析结果(表 3 和表 4)可知,各因素对小麦植株氮素累积量的影响程度依次为:施氮量>拔节期灌水>灌浆期灌水>抽穗期灌水>分蘖期灌水,其中施氮量对氮素累积量的影响达到极显著程度。对施氮量进行

多重比较可知,获得最大氮素累积量的试验处理组合为施氮 224 kg/hm²,这说明植株的氮素累积量与施氮量呈正相关。

2.6 水氮互作对春小麦籽粒氮素累积量的影响

表 2 结果显示,处理 1 的小麦籽粒氮素累积量最大,分别是处理 4 和处理 13 的 1.79 和 2.19 倍。高氮处理的氮肥收获指数(籽粒吸氮量与植株吸氮量的比值)的变化幅度较大,为 0.403~0.510,处理 3 的氮肥收获指数大于处理 1 和处理 2,这可能是由于在水分相对充足的条件下,氮素向籽粒转移的比例略有减小。在灌溉定额为 240 mm 的所有处理中,中氮处理的小麦籽粒氮素累积量均值最大,低氮处理次之,特低氮处理最小,这与小麦植株氮素累积量的表现规律一致,说明氮素累积量与施氮量呈正相关。统计分析结果(表 3 和表 4)表明,各因素对小麦籽粒氮素累积量的影响大小依次为:施氮量>拔节期灌水>抽穗期灌水>灌浆期灌水>分蘖期灌水,其中施氮量对氮素累积量影响达极显著水平,拔节期灌水量影响显著,其余因素影响不显著。由前面分析可知,抽穗期灌水对小麦产量影响显著,所以其对籽粒氮素累积量的影响位次在灌浆期之前。结合多重比较结果可知,获得籽粒最大氮素累积量的处理组合应为:施氮量 168 kg/hm²,拔节期灌水量 90 mm。这说明拔节期高水高氮处理可以获得最大的生物产量,但并不能提高水氮的利用效率。

3 讨 论

水分和养分对作物生长的影响不是孤立的,而是相互作用的。根系吸水和养分吸收是两个独立的过程,但水分的有效性影响着整个土壤的微生物群落、物理性质及其生理生化过程,使得土壤水分和养分密切而复杂地联系在一起。在有限灌溉的条件下,配合适量的养分,能够使水分得到更有效的利用^[19-20]。本研究结果表明,在高氮条件下进行充分灌溉处理,小麦籽粒产量和地上干物质产量均能达到最高,而全生育期低水和特低水处理明显降低了干物质累积量,浪费了氮肥资源。虽然处理 4(全生育期特低水)的水分利用效率最大,但其以牺牲产量为代价。灌溉定额均为 240 mm 而各生育期的灌水定额不同时,春小麦的产量和地上部分干物质的累积量差异明显,说明小麦在不同生育阶段的需水量及其对水分的敏感程度不同,灌溉时应根据作物需水量和灌水时间对产量的贡献程度来分配水量,大水漫灌和全生育期固定一个灌水定额是不科学的。

收获指数以生物学产量为基础,片面追求收获指数的最大值而忽视籽粒产量是没有意义的。高的生物学产量不仅在表观上是实现高籽粒产量的数量保证,而且也是实现高收获指数的生理基础。通过调整作物不同生育期的水氮供应,协调产量与收获指数之间的关系,在获得较大产量的同时收获指数也较大,可以此实现水氮的高效利用。水氮互作对作物的水氮利用存在一定的交互作用,土壤水分亏缺影响植株对氮素的吸收,从而降低营养器官的含氮量,并影响植株的正常生理功能,使氮“源”减少,运输能力降低。在小麦生育后期,随着土壤水分胁迫的进一步加剧,籽粒中的氮“库”变弱变小,对“源”的拉力减弱,最后势必使各营养器官氮素转移量和转移率降低,最终影响籽粒产量和水氮利用效率。因此,保证作物关键时期的水氮供应,才能获得高产和较高的水氮利用效率。由本试验结果可知,影响小麦群体产量和水氮利用的因素各不相同,要获得较高的籽粒产量,就必须保证施氮量为 168~224 kg/hm²,拔节期和抽穗期灌水 60~90 mm,只有合理匹配水肥因子,才能起到以肥调水、以水促肥,并充分发挥水肥因子的整体增产作用。

4 结 论

本试验结果表明,施氮量及拔节期和抽穗期灌水,对于干旱区春小麦的产量影响显著,施氮量为 168 kg/hm²、拔节期灌水 90 mm、抽穗期灌水 70 mm,可以获得较高的籽粒产量。水氮对小麦地上干物质累积量的影响与对籽粒产量的影响相似,但抽穗期灌水对地上干物质累积量影响不显著。施氮量为 224 kg/hm²、抽穗期和灌浆期灌水均为 50 mm,可以使小麦获得较高的收获指数,在生产中考虑提高收获指数时,首先应保证较高的籽粒产量。分蘖期和灌浆期灌水均为 30 mm 时,可以使小麦获得较高的水分利用效率,但以牺牲产量为代价。施氮量对小麦地上干物质和籽粒的氮素累积量影响显著,拔节期灌水 90 mm、施氮量 168 kg/hm² 时,籽粒的氮素累积量最大。为获得较高产量和提高水氮利用效率,建议石羊河流域春小麦的最优水氮交互模式为:施氮量 168 kg/hm²,全生育期灌水 4 次,拔节期灌水为 90 mm,分蘖期、抽穗期、灌浆期均灌水 60 mm。

[参考文献]

[1] 杜 群. 西北地区水资源可持续管理与防治土地退化的区域政策——以石羊河流域为例 [J]. 资源科学, 2004, 26(6): 77-82.

- Du Q. Regional policies for sustainable management of water resources to combat land degradation in north-west China: the case of Shiyang River Basin [J]. *Resources Science*, 2004, 26(6): 77-82. (in Chinese)
- [2] 尉元明, 朱丽霞, 乔艳君, 等. 干旱地区灌溉农田化肥施用现状与环境影响分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(5): 65-69. Wei Y M, Zhu L X, Qiao Y J, et al. The agricultural fertilization and its impact on the environment in the arid area [J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2003, 17(5): 65-69. (in Chinese)
- [3] 李晓欣, 胡春胜, 张玉铭, 等. 华北地区小麦-玉米种植制度下硝态氮淋失量研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 7-11. Li X X, Hu C S, Zhang Y M, et al. Losses of nitrate-nitrogen from a wheat-corn rotation in north China [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 7-11. (in Chinese)
- [4] Zhu Z L. Loss of fertilizer N from Plant-soil system and strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil and Environmental Science*, 2000, 9(1): 1-6.
- [5] Benbi D K, Biswas C R, Kalkat J S. Nitrate distribution and accumulation in an ustochrept soil profile in a long term fertilizer experiment [J]. *Fertilizer Research*, 1991, 28: 173-177.
- [6] Beay-Singh, Yadving-singh, Khind C S, et al. Leaching losses of urea-N applied to permeable soil under lowland rice [J]. *Fertilizer Research*, 1991, 28: 179-184.
- [7] 杜太生, 康绍忠, 张建华, 等. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2546-2555. Du T S, Kang S Z, Zhang J H. Response of cotton growth and water use to different partial root zone irrigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2546-2555. (in Chinese)
- [8] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应 [J]. *作物学报*, 2007, 33(12): 1982-1990. Du T S, Kang S Z, Wang Z C, et al. Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(12): 1982-1990. (in Chinese)
- [9] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2061-2068. Du T S, Kang S Z, Hu X T, et al. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2061-2068. (in Chinese)
- [10] 汪杰, 王耀琳, 李昌龙, 等. 民勤绿洲水资源利用中的问题与节水途径 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 103-107. Wang J, Wang Y L, Li C L, et al. Problems existing in water resources utilization and water-economizing ways in the Min-qin oasis of Gansu province [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 103-107. (in Chinese)
- [11] 王立秋, 曹敬山, 靳占忠. 春小麦产量及其品质的水肥效应研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 58-63. Wang L Q, Cao J S, Jin Z Z. A study on the water and fertilizer effect on spring wheat yield and quality [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 58-63. (in Chinese)
- [12] Singh P N, Joshi B P, Singh G. Water use and yield response of wheat to irrigation and nitrogen on an alluvial soil in North India [J]. *Agriculture Water Manage*, 1987, 12: 311-321.
- [13] Kerentajer L, Berliner P R. Effects of moisture stress on nitrogen fertilizer response in dryland wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1988, 80: 977-981.
- [14] Sharma B D, Jalota S K, Kar S, et al. Effect of nitrogen and water uptake on yield of wheat [J]. *Fertilizer Research*, 1992, 31: 5-8.
- [15] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 II. 不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(1): 8-13. Jin K, Wang D S, Cai D X. Response and interaction for water and fertilizer II. the effect of different compositions of N, P and water on the yield of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(1): 8-13. (in Chinese)
- [16] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 等. 冬小麦对水肥的反应差异与节水冬施肥技术 [J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(2): 36-40. Tang Y X, Meng C X, Jia S L. Different responses of wheat to water and fertilizer and technique of fertilizer application to wheat with water-saving irrigation in winter [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 1996, 14(2): 36-40. (in Chinese)
- [17] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1188-1195. Zhai B N, Li S X. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1188-1195. (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-60. Bao S D. Soil chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 49-60. (in Chinese)
- [19] Singh K P, Kumar V. Water use and water-use efficiency of wheat and barely in relation to seeding dates, levels of irrigation and nitrogen fertilization [J]. *Agriculture Water Management*, 1981, 3(4): 305-316.
- [20] 东先旺, 刘树堂, 陶世荣. 不同肥水组合对夏玉米水分利用效率经济效益的影响 [J]. *华北农学报*, 2000, 15(1): 81-85. Dong X W, Liu S T, Tao S R. The effects of water use efficiency and economic benefit in summer corn under different water coordinating fertilizer [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2000, 15(1): 81-85. (in Chinese)