

# 不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验

孔东<sup>1,2</sup>, 晏云<sup>3</sup>, 段艳<sup>4</sup>, 陆文红<sup>1</sup>, 徐海洋<sup>1</sup>

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 中国水利水电科学研究院水利所, 北京 100044;  
3. 北京市水利建设管理中心, 北京 100036; 4. 水利部综合开发管理中心, 北京 100053)

**摘要:** 该文以促进农业用水增效为目的, 开展了作物水肥生理调控技术研究, 选用主要农作物冬小麦, 进行不同水肥耦合的灌溉试验, 对冬小麦生理指标(株高、干物质质量、叶面积指数、光合作用和籽粒产量等)进行了统计分析, 初步探索了冬小麦对水肥(氮)需求影响的规律。通过对冬小麦生理生育指标的统计分析比较可知各个处理之间各生物指标的生长趋势相同, 而 200 kg/hm<sup>2</sup> 氮处理的各生物指标普遍优于 100 kg/hm<sup>2</sup> 氮处理的各生物指标, 这表明在低肥力条件下适当的增施氮肥, 可以提高产量, 不过各个处理下冬小麦籽粒产量和总生物量并无显著性差异。在水分处理上灌浆水和返青水很关键, 只是在灌灌浆水时已进入雨季, 可以减少灌溉水量而充分利用雨水。为减少对环境的污染, 建议在生产上考虑选择 100 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥量, 并不显著影响冬小麦的生长及最终产量。

**关键词:** 节水灌溉, 氮肥, 作物生长, 产量, 冬小麦

**中图分类号:** S158.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0036-05

孔东, 晏云, 段艳, 等. 不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 36-40.

Kong Dong, Yan Yun, Duan Yan, et al. Field experiment study on growth and yields of winter wheat under different water and nitrogen treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 36-40.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

水资源短缺已成为国民经济和社会发展的主要制约因素, 节水灌溉技术研究已经成为解决水资源危机的重要途径之一。而近 50 a 来, 中国农业生产取得了举世瞩目的成就, 粮食总产量由 1949 年的  $1.13 \times 10^8$  t, 增加到 2005 年的  $4.84 \times 10^8$  t, 增加了 4.28 倍, 单产由 1.0 t/hm<sup>2</sup> 提高到 4.64 t/hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>, 这一成就的取得与化肥(尤其是氮肥)的大量施用密切相关。根据联合国粮农组织(FAO)对 41 个国家长达 18 a 试验示范所得的 41 万个数据统计结果, 化肥在粮食增产中的作用达 60% 以上(FAO Fertilizer Yearbook, 1998); 国内大量研究也表明, 化肥在中国粮食增产中的作用占 40%~50%<sup>[2]</sup>。中国化肥施用量从 1952 年的 7.8 万 t 增加到 2005 年的 4766.2 万 t, 其中氮肥施用量由 1980 年的 934.2 万 t 纯氮, 增加到 2005 年 2229.7 万 t, 20 a 内增加了 1295 余万 t<sup>[1]</sup>。在今后的 30 a 中, 中国的人口还将继续增加, 为了满足人口对农产品的需求, 除了需要增加灌溉面积、灌溉用水量外, 氮肥的施用量也相应增加。而近年来, 由于氮肥施用量不断增加和施用方式的不合理, 已造成了北方某些地区地下水中硝酸盐含量超过饮用水标准<sup>[3]</sup>, 直接威胁着该地区人民的健康。因此, 在农作物栽培中制定合理的水肥管理措施对于减少污染保护人类的生存环境具有十分

重要的现实意义。而大量的研究表明, 土壤中氮肥的效益能否充分发挥与农田水分状况关系十分密切, 不同的土壤水分条件下, 施肥量与产量的响应关系是不同的。固定肥料用量, 在试验供水范围内水分和小麦产量呈近似直线关系; 固定供水量, 施肥量和小麦产量呈抛物线关系。氮肥用量和供水量之间有明显的正交互作用<sup>[4]</sup>。在低供水水平时(冬小麦仅灌拔节水的节水灌溉处理), 肥料的增产效益十分显著, 但氮肥贡献率随施肥量的增加而呈递减的趋势。冬小麦施尿素 400 kg/hm<sup>2</sup> 和 200 kg/hm<sup>2</sup> 两个施肥水平的试验处理所获得的水(肥)分生产率最高, 由于两者的水分生产率差异不大, 建议采用 200 kg/hm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。当今水资源更加紧缺, 在实施节水灌溉制度的同时, 如何制定合理的农田水肥管理制度, 已成为当前一项重要而紧迫的任务。本文在前人研究的基础上, 采用低水平氮肥下的不同水氮处理, 深入了解作物在不同生育阶段对水肥的需求, 为合理实施水肥管理提供依据。

## 1 试验地基本情况及材料与方法

试验于 2004 年 10 月开始至 2005 年 6 月结束, 试验地点国家节水灌溉北京工程技术研究中心大兴试验基地, 位于北京市大兴区魏善庄镇东研堡乡。土壤质地: 0~40、130~200 cm 为粉砂壤土; 40~130 cm 为砂壤土。土壤 0~100 cm 平均干容重为 1.412 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量 33.1% (体积比), 田间饱和含水率 45.6% (体积比), 地下水位在 20 m 以下。

2004 年 9 月结合耕地施入底肥, 各小区施入底肥量相同, 为 150 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥, 250 kg/hm<sup>2</sup> 有机肥。之后平整地块, 松翻土壤。供试作物为冬小麦(京黑 1 号), 2004

收稿日期: 2007-08-07 修订日期: 2008-10-09

基金项目: 由中国水利院科研专项节集(05QN01); 水利部公益性项目(200701002)资助

作者简介: 孔东(1972-), 女, 博士, 主要从事灌溉排水新技术与应用方面的研究。北京宣武区广安门南街 60 号荣宁园 4108 室, 100054。

Email: kongdong2002@163.com

年 9 月 28 日播种，播种密度 13.8 kg/hm<sup>2</sup>，行距 15 cm，2005 年 6 月 17 日收获。冬小麦生育阶段分为 5 个阶段：苗期（2004 年 9 月 28 日—2004 年 10 月 6 日）、越冬返青期（2004 年 10 月 7 日—2005 年 4 月 10 日）、拔节期（2005 年 4 月 11 日—2005 年 4 月 30 日）、孕穗开花期（2005 年 5 月 1 日—2005 年 5 月 25 日）、灌浆成熟期（2005 年 5 月 26 日—2005 年 6 月 17 日）。

此试验的试验目的是在减少面源污染的前提下进行的，因此参考其他研究人员<sup>[4-6]</sup>试验结果的基础上进行试验设计，施肥量的选取只设了 2 个水平，且肥量标准偏低。施用尿素量分别为：200 kg/hm<sup>2</sup>，100 kg/hm<sup>2</sup>，尿素含氮量 0.4568；结合河北地区冬小麦灌溉的生产实践，水分处理为 2 种水平，取河北经验灌溉定额和 1/2 经验灌溉定额；全生育期灌溉 3 次，越冬水、返青拔节水和孕穗开花水；并设对照 CK（灌水量为经验灌溉定额，施尿素量 200 kg/hm<sup>2</sup>）。具体试验处理见设计表 1。每个试验处理设 3 个重复，所有处理采用插花法布置，共 24 个试验小区。每一处理试验小区面积为 5 m×5 m=25 m<sup>2</sup>，为防止地面灌溉串水和小区间灌溉水、肥侧向渗漏，每个小区之间设 1 m 宽的隔离带，每个小区内设 1m 的保护行，因此实际采样小区为 3 m×3 m=9 m<sup>2</sup>。每块试验田埋设一套 TDR 测管。由于试验属于田间种植，未设测坑及防雨棚，种植条件与大田无异。

表 1 水肥耦合试验设计

Table 1 Experimental design of water and fertilizer coupling

处理号	施尿素量 /kg·hm <sup>-2</sup>	04/11/17 越冬期灌溉 水量/mm	05/4/13 返青拔节期 灌溉水量/mm	05/5/13 孕穗开花期 灌溉水量/mm
HW (CK)	200	80	90	100
LW	100	80	90	100
HW1	200	40	90	100
LW1	100	40	90	100
HW2	200	80	45	100
LW2	100	80	45	100
HW3	200	80	90	50
LW3	100	80	90	50

注：H 代表高氮水平处理，L 代表低氮水平处理，W 代表水份处理，数字 1、2、3 代表 3 个不同的灌水时段。

试验小区布设有灌溉管道，引用地下水进行灌溉，水表计量水量。在实施灌水时根据降雨情况，适当调整灌水定额，以符合试验要求。试验基地内设有气象站，称重式蒸渗仪，蒸渗仪面积为 2 m×2 m，对照处理种植在称重式蒸渗仪内，可精确测定作物的实际蒸发蒸腾量。总生育期内降雨总量为 286.37 mm。

株高是在生育期内每 7 d 观测一次，测量时每个处理取 5 株实行定株观测，以减少误差。干物质质量是每个生育阶段测定一次，测量时每个处理沿一垄取 10 cm 小麦测地上部分鲜质量，然后用 105℃杀青，在 75℃恒温下烘干后称质量。

叶面积指数是每个生育阶段测定一次。测量时每个处理沿一垄取 10 cm 的小麦叶片，用剪刀剪下全部鲜叶片后用 Cannon 叶面积扫描仪求其叶面积 A (cm<sup>2</sup>)。设作物样点行距为 ROW，取样点的叶面积 A，叶面积指数 LAI 估算为：

$$LAI = \frac{A}{10 \times ROW} \quad (1)$$

光合速率是采用英国产 CIRAS-1 型便携式光合测定仪测定，每个生育阶段测定一次，选择晴朗天气，在自然气象状态下于 8：00、10：00、12：00、14：00、16：00、18：00 分 6 次测定。每个小区选取 5 棵植株，在每棵植株的相同部位选取生长正常的向阳叶片进行测定，每片叶读取数据 2 次，取 10 次结果进行数据分析。

收割前组织考种，每个试验小区取 1 m<sup>2</sup> 典型样本，计算 1 m<sup>2</sup> 内的株数、有效穗数、无效穗数，在样本中取 20 株测其株高、穗长、穗粒数及干物质。各小区单打单收，测定其产量和千粒重。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对冬小麦株高的影响

由表 2 中可见，HW<sub>i</sub> (i=0, 1, 2, 3) 处理的株高普遍比 LW<sub>i</sub> (i=0, 1, 2, 3) 处理的株高长势良好。说明冬小麦株高的生长对不同氮肥处理有一定响应，但差异性不大。可以看出在进入拔节期株高对水、氮的响应最明显，进入抽穗期后由于株高已几乎定型，所以各处理间的株高差异不再显著。

表 2 冬小麦株高平均数比较与方差分析

Table 2 Mean comparisons and variance analyse of winter wheat height

处理	05/4/10	05/5/11	05/5/24	05/6/11	差异来源	自由度	05/4/10	05/5/11	05/5/24	05/6/11	$F_{0.05}$
	株高均数					$DF$	$F$ 值	$F$ 值	$F$ 值	$F$ 值	
LW	25.27a	63.85ab	67.60b	67.89a	氮素	1	6.03*	1.74	17.05*	6.76*	3.93
LW1	25.20a	60.33a	63.29a	66.47a	水分	3	4.87*	4.56*	1.73	1.78	2.69
LW2	23.00a	61.20ab	63.33a	65.07a	交互	3	2.29	0.44	0.44	3.60*	2.69
LW3	23.60a	65.50b	65.73ab	70.73a	内部误差	112					
HW	27.80b	65.10b	67.99b	71.39a	总变异	119					
HW1	24.53a	62.13a	69.20b	71.68a							
HW2	25.40a	64.93ab	66.22ab	69.33a							
HW3	24.53a	65.93b	69.33b	72.76a							

## 2.2 不同水氮处理对冬小麦叶面积指数的影响

从图 1 中可看出, 叶面积指数变化趋势相似, 经历了迅速增长—趋于平缓—迅速下降 3 个阶段。进入拔节期作物群体叶面积迅速生长, 至抽穗期叶面积指数达到最大。此时, 叶片内有机物向生殖器官内转化, 孕穗期后, 植株下部叶片开始衰老死亡, 作物群体光合面积减小, 叶面积指数下降, 直至成熟收获。

图 1 中处理 HW3、HW 叶面积指数在各处理中值最大, 最大达到 5.76 和 5.48, 说明高氮处理的叶面积指数要高于低氮的处理。在同一氮肥不同阶段缺水的处理中, 总体趋势是返青水缺水灌溉的叶面积下降迅速, 最高下降速率为 LW2 达到 0.051/d, 处理 HW2 的下降速率为 0.027/d。其余处理高氮处理的叶面积指数仍然在上升而低氮处理的叶面积指数除处理 LW3 外, 其他 3 个处理均开始下降。不过 LW3 处理的叶面积指数在 8 个处理中是最低的, 说明返青水很重要。返青期是冬小麦进入生长旺盛的关键阶段, 因此对水分很敏感, 而尽管处理 LW、LW3 在这阶段没有缺水但由于氮肥施入量偏低, 水分的利用率不高, 因此在生长上并没有表现出优越性。

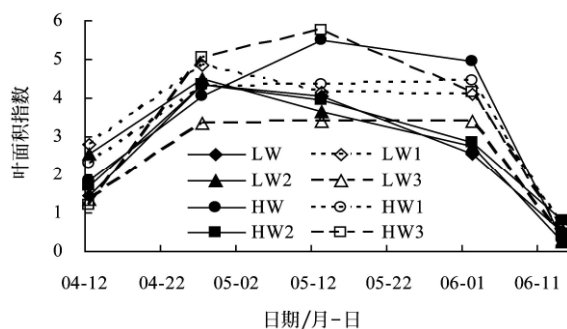


图 1 不同处理下冬小麦叶面积指数随时间变化

Fig.1 Changes of leaf area index of winter wheat with time under different treatments

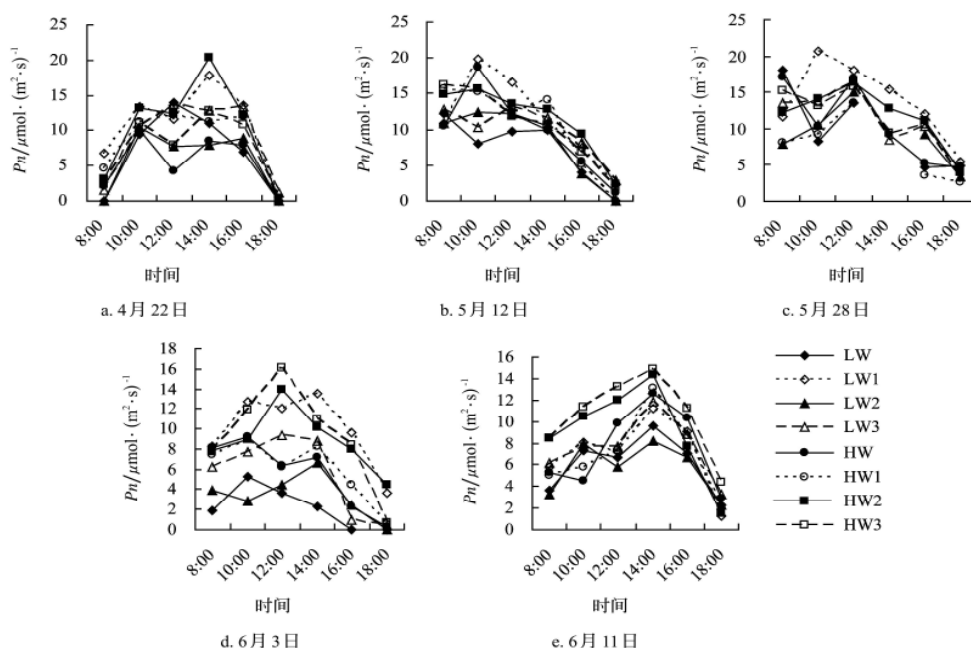


图 3 冬小麦净光合速率日变化

Fig.3 Diurnal changes of net photosynthetic rate of winter wheat

## 2.3 不同水氮处理对冬小麦干物质积累的影响

图 2 中, 在拔节期前各处理未见差异, 进入拔节期后差异明显。如处理 HW2 进入抽穗期后生长旺盛增长量达到 64.14 g/d, 而相同水分、不同氮肥处理的 LW2 在此阶段增长量为 23.08 g/d, 最终干物质积累量是处理 HW2 的 75.33%。其他低水、低氮处理虽然与相同时期高水、高氮处理经方差分析后, 虽无明显差异性, 但也是高氮、高水, 大于低氮、低水处理的。

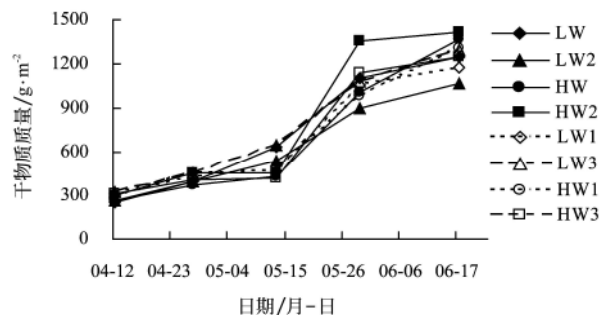


图 2 不同处理下冬小麦干物质质量随时间变化

Fig.2 Changes of dry weight of winter wheat with time under different treatments

## 2.4 不同水氮处理对冬小麦光合作用的影响

### 2.4.1 对光合速率 ( $P_n$ ) 的影响

不同时段下冬小麦光合速率日变化如图 3 所示。在 5 个测定时段中, 除 5 月 28 日各处理光合速率日变化趋势有所不同外, 其他 4 个时段的日变化虽然峰值出现的时间不同, 但在当天各处理日变化趋势上几乎是相同的, 而峰值出现的时间会因作物、土壤状况和天气情况而存在差异。冬小麦光合速率  $P_n$  从早上 8:00 开始迅速升高, 在 6 月 5 日 (黄熟期前) 的各不同处理的  $P_n$  呈现双峰曲线, 进入黄熟期后高氮肥处理的光合速率  $P_n$  呈现为单峰曲线。由图 3a 可见, 除处理 HW2 外, 其他 3 个高氮处

理的  $HW_i(i=0,1,3)$  光合速率  $P_n$  在中午比低氮处理的  $P_n$  低。图 3b、图 3c 则除了处理  $LW1$  外高氮处理  $HW_i(i=0, 2, 3)$  大于相应阶段的低氮  $LW_i(i=0, 2, 3)$  处理。进入成熟期高氮处理  $HW_i(i=0, 1, 2, 3)$  的  $P_n$  值均大于相应阶段低氮  $LW_i(i=0, 2, 3)$  处理。整体趋势说明  $200\text{ kg/hm}^2$  的氮肥量比  $100\text{ kg/hm}^2$  氮肥处理光合速率高。处理  $HW3$ 、 $HW2$  的  $P_n$  值偏高同时说明不是灌溉水量越多光合速率就越高，生育后期过度的水量反而抑制其光合作用。

2.4.2 对叶片蒸腾速率 ( $Tr$ ) 的影响

图 4 中可见，5 月 12、5 月 28、6 月 3 与相对应的光合速率变化趋势一致，而 4 月 22 日的  $Tr$  则在早晨 8:00 蒸腾速率就很高到中午时出现午休现象，下午 16:00 左右达到峰值的双峰曲线，而在图 4b、图 4c、图 4d 中适度水分亏缺的处理也会出现双峰的午休现象。如 5 月 12 日的  $HW1$ 、 $LW1$ 、 $HW2$ 、 $HW3$ ，5 月 28 日的  $HW3$ 、 $HW3$ 、 $LW1$ ，因此与前面得到的结论一致，在抽穗期和黄熟期过量的水分抑制叶片的蒸腾，整体趋势仍然是高氮处理的蒸腾速率大于低氮处理的。

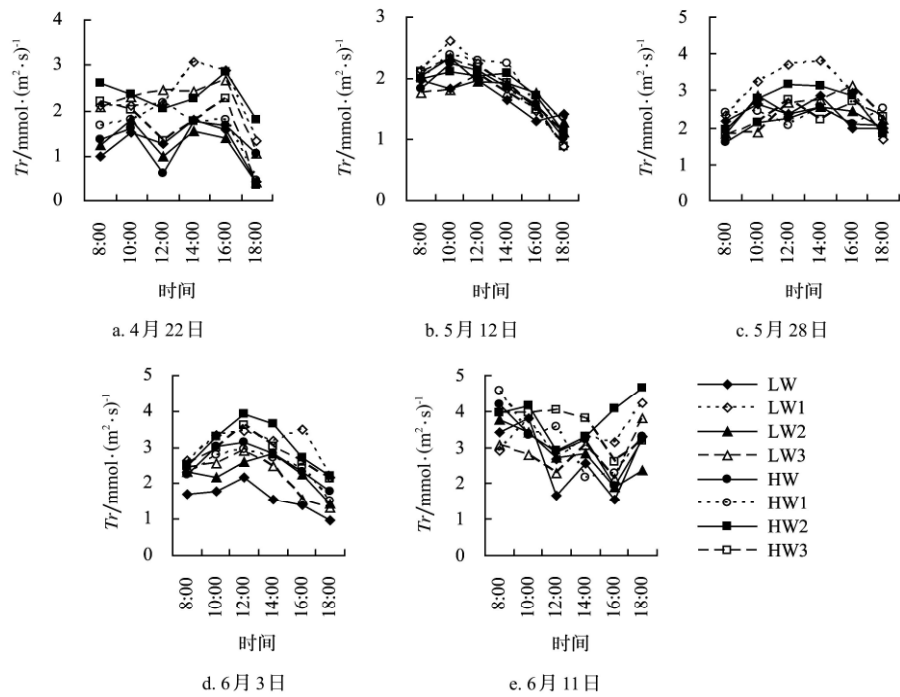


图 4 冬小麦叶片蒸腾速率日变化  
Fig.4 Diurnal changes of leaf transpiration rate of winter wheat

2.5 不同水氮处理对冬小麦产量的影响

从图 5 和表 3 中来看，高氮处理的产量虽高于在相同水分处理下低氮处理的产量，但无显著性差异；而在相同氮肥处理下不同时段进行水分亏缺的产量均为越冬水和返青水减半后产量偏低，尤其是低氮处理中的产量更明显，说明返青水很关键，而生育后期适度缺水对生长有一定的促进作用。

表 3 冬小麦产量方差分析

Table 3 Variance analyse of winter wheat yield					
差异来源	DF	MS	F	P	F <sub>0.05</sub>
氮素	1	12657.16	2.888793	0.108552	4.493998
水分	3	3743.107	0.854304	0.484629	3.238867
交互	3	3013.897	0.687874	0.572512	3.238867
内部误差	16	4381.47			
总变异	23				

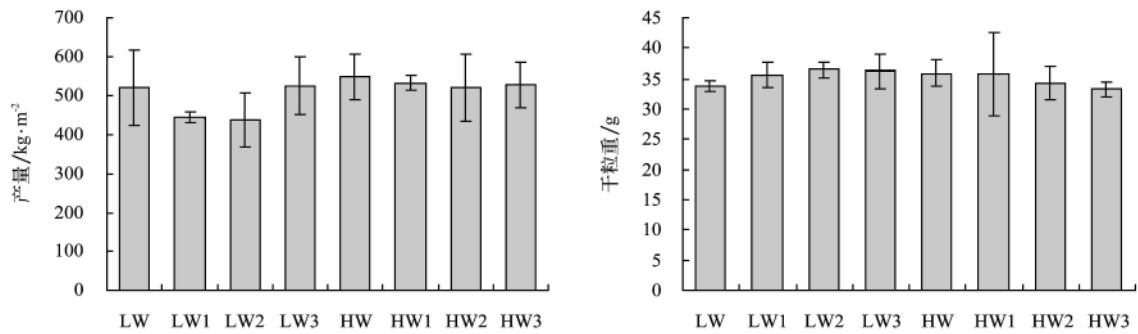


图 5 冬小麦不同处理产量、千粒重  
Fig.5 Yields and thousand grains weight of winter wheat under different treatments

## 4 结 论

从上面对冬小麦生理各项指标的分析可知,在第一水减半灌溉促进了根系的生长,而株高在拔节期对水分、氮素最敏感,拔节期和灌浆期是用水敏感期,因此在这两个生育阶段应该保证灌溉水量的充足。而在生育后期适量的减少灌溉水量反而促使冬小麦的生长,因此在此阶段可减少灌溉水量。在灌灌浆水时已进入雨季,可以减少灌溉水量而充分利用雨水,并不影响冬小麦的生长及最终产量,因此此时是节约灌溉水的有利时机。在此试验中,根据试验目的选用的试验用肥量标准偏低,因此得出的结论是本试验设计的高氮施肥量为  $200 \text{ kg/hm}^2$ 。但施肥量为  $100 \text{ kg/hm}^2$  时虽产量低于  $200 \text{ kg/hm}^2$  处理的,但差异性不显著,且对降低面源污染有好处。如为了降低氮肥污染,保护环境,在北京地区种植冬小麦时,在产量相差不是很大的程度下,可考虑施肥量为  $100 \text{ kg/hm}^2$ 。

### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [2] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 3—4.
- [3] 王 康. 节水条件下 SPAC 系统氮素迁移与作物增产和环境效应的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [4] 巫东堂, 李红梅, 焦晓燕. 旱地麦田水肥关系及产量的影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 39—42.
- [5] 沈荣开, 王 康, 张瑜芳. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 35—38.
- [6] 王凤新, 冯绍元, 黄冠华. 喷灌条件下冬小麦水肥耦合效应的田间试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(1): 10—13.
- [7] 孔 东, 史海滨, 魏占民, 等. 干旱区不同水盐处理对向日葵生理性状的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(1): 44—46.
- [8] 孔 东, 史海滨, 李延林, 等. 不同盐分条件下油菜光合日变化特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 111—115.
- [9] Kong Dong, Shi Haibin, Wei Zhanmin, et al. Study on Photosynthesis of Sunflower as Affected by Soil Salt Levels[A]. Land and Water Management Decision Tools and Practices[C]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 1251—1256.
- [10] Shi Haibin, Takeo Akai, Kong Dong, et al. Study on Sunflower Response to Soil Water and Salt Stress in the Hetao Area, China[R]. Pro-ceedings of International Conference on Water-saving Agriculture and Sustainable use of Water and Land Resources, 2003, 10: 111—116.
- [11] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, (6): 291—296.
- [12] 张喜英, 斐 冬, 由懋正. 太行山前平原冬小麦优化灌溉制度的研究[J]. 水利学报, 2001, 32(1): 90—96.
- [13] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [14] Jarvis S C. Future trends in nitrogen research[J]. Plant and Soil, 1996, 182: 47—56.
- [15] Harper L A, Sharpe R R, Langdale G W, et al. Nitrogen Cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport[J]. Agronomy Journal, 1987, 79(11/12): 965—973.
- [16] Sharma B D, Kar S, Cheema S S. Yield, water use and nitrogen uptake for different water and N levels in winter[J]. Fertilizer Research, 1990, 22: 119—127.

## Field experiment on growth and yields of winter wheat under different water and nitrogen treatments

Kong Dong<sup>1,2</sup>, Yan Yun<sup>3</sup>, Duan Yan<sup>4</sup>, Lu Wenhong<sup>1</sup>, Xu Haiyang<sup>1</sup>

(1. National Center for Irrigation and Drainage Development, Beijing 100054, China;

2. China Insistute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

3. Beijing Center of Hydraulic Building Management, Beijing 100036, China;

4. Center of Comprehensive Development and Management of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of irrigation water and fertilizer utilization, plant physiological regulation technology for water and fertilizer was studied. In the study, irrigation experiment with water and fertilizer was conducted in field. Winter wheat was selected to plant. To reveal the response rule of winter wheat to water-fertilizer condition, its physiological indexes (including plant height, dry weight, LAI, photosynthesis and grain yield, etc.) were analyzed. The growth trends of winter wheat are similar under different treatments. And all indexes of winter wheat under nitrogen treatment of  $200 \text{ kg/hm}^2$  are better than that of  $100 \text{ kg/hm}^2$ . Results indicate that properly increasing of nitrogen application may improve yield of winter wheat in low fertilize condition, but there are no significant differences between winter wheat grain yield and total biomass of winter wheat under different treatments. As for water treatment, irrigations in milking stage and jointing stage are keys for winter wheat growth. Irrigation water amount may properly decrease in order to full use rainwater because that milking stage is in rain period. In order to reduce pollution, nitrogen treatment of  $100 \text{ kg/hm}^2$  is suggested to select, which is not affect observably to plant growth and it yield.

**Key words:** water-saving irrigation, nitrogen fertilize, grain growth, yield, winter wheat