

# 淮北地区小麦生长期灌溉对产量和水肥利用效率的影响\*

詹其厚 陈杰<sup>†</sup>

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

## EFFECT OF IRRIGATION ON YIELD AND WATER AND FERTILIZER USE EFFICIENCIES OF WHEAT IN HUAIBEI AREA

Zhan Qihou Chen Jie<sup>†</sup>

(State Key Lab of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China)

关键词 小麦;产量;生理干旱;灌溉;水分利用效率;肥料利用效率  
中图分类号 S512.106 文献标识码 A

地处北亚热带向暖温带过渡季风区域的淮北地区,由于降水时空分布不均,土壤水分物理性质不良,造成旱涝频发,一直是该区农业生产的主要障碍因素<sup>[1~4]</sup>。长期以来,如何合理调控水肥、提高施肥效率、培育土壤质量、实现高产稳产,一直是该区农业生产实践中面临的重要问题。本文对淮北地区主要旱粮作物小麦生育期间的水肥效应进行了系统研究,在此基础上对小麦生育期干旱缓解、灌溉与施肥效率提高的技术措施进行了初步阐释,为本区小麦高产稳产的水肥管理实践提供科学依据。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验地点与区域降水特征

田间试验于 2004 年在中国科学院怀远农业生态实验站试验基地进行(32°59'N, 117°06'E)。试验区年均降水量 900 mm 左右,年均蒸发量 1 600 mm 左右。降水年际、年内分布不均匀,差异较大。一年中以夏季降雨最多(约占 56%),春季次之(约占 20%),秋季较少(约占 16%),冬季最少(约占 8%)。降水年内分布不均使得有效降水量只占总降水量的 75%~85%。4 月中旬至 5 月中旬多干燥的西南风,

加速土壤蒸发,使扬花或灌浆期的小麦常受干旱影响,造成减产和品质下降。

### 1.2 土壤基本性状

试验区土壤为变性土。由于该类土壤粘土矿物以胀缩性强的蒙脱石为主,干缩湿胀现象十分明显,土壤有效蓄水量低,通气性差。同时,土壤质地粘重,棱柱状结构明显,保墒能力差。不良的土壤水分物理性质使其易遭受旱、涝(渍)危害。本次试验 0~25 cm 土层的土壤养分状况为:有机质 13.5 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮(N) 87.6 mg kg<sup>-1</sup>、有效磷(P) 6.9 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾(K) 94.0 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 试验设计

试验设氮肥和水分双因素。氮肥 4 个水平,分别为施氮 0 (N<sub>1</sub>)、120 (N<sub>2</sub>)、195 (N<sub>3</sub>)、270 (N<sub>4</sub>) kg hm<sup>-2</sup>,其中,N 肥 80%作基肥,20%作追肥。水分 2 个水平,分别为不灌(W<sub>1</sub>,指完全依靠自然降水,遇旱时不进行外源补充)和灌溉(W<sub>2</sub>,根据拟订的灌溉指标,遇旱时进行灌溉)。水肥共组成 8 个处理(N<sub>1</sub>W<sub>1</sub>、N<sub>1</sub>W<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>W<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>W<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>W<sub>1</sub>、N<sub>3</sub>W<sub>2</sub>、N<sub>4</sub>W<sub>1</sub>、N<sub>4</sub>W<sub>2</sub>)。另外,试验区基肥施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 120 kg hm<sup>-2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O) 120 kg hm<sup>-2</sup>。试验采用随机区组排列,重复 3 次,共计 24 个田间小区,每个小

\* 中国科学院农业项目办公室(NK十五-A-07)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-427)资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: jchen@issas.ac.cn

作者简介:詹其厚(1969~),男,助理研究员,主要从事土壤资源与质量方面的研究工作。E-mail: qhzhn@issas.ac.cn

收稿日期:2005-04-20;收到修改稿日期:2005-07-25

区面积为 36.0 m<sup>2</sup>,各小区间隔 1.5 m,并用埋深 1.0 m 的塑料薄膜隔离,防止小区间水分发生侧渗。

根据小麦各生育阶段需水特点并结合土壤水分物理性质制定需灌溉的土壤水分下限指标。该指标是以占田间持水量的百分数表示,若低于下限指标,就可能发生土壤干旱,造成减产。本次试验区土壤田间持水量为 27.5%,需灌溉的土壤水分下限指标确定为:0~40 cm 土层播种出苗期 70%,幼苗期 65%,分蘖期 70%,越冬期 60%,返青期 70%,0~60 cm 土层拔节至灌浆期为 75%,0~40 cm 土层成熟期为 70%。在小麦生长期,每 5~10 d 测定一次土壤水分,分 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 四层分别测定,雨前和雨后各加测一次。同时对降雨量、蒸发量进行观测。收获时分区对小麦籽粒产量、生物量进行测定,并取样分析籽粒和植株含氮量。

#### 1.4 测定项目与方法

植株、籽粒氮含量测定:采用半微量凯氏定氮法。

作物耗水量:是指在水分供应充足,不影响作物生长发育的情况下,作物对水分的需求量,即农田需水量,其计算方法主要根据农田水量平衡法公式:

$$E_T = P_E + I + R - W \quad (1)$$

式中, $E_T$ 为作物耗水量(mm); $P_E$ 为有效降雨量(mm); $I$ 为灌溉量(mm),不灌处理  $I=0$ ;  $R$ 为地下水补给量。在淮北地区小麦生长季由于地下水较深,其补给量可忽略不计,即  $R=0$ ;  $W$ 为试验时段末与时段初土壤储水量之差,即  $W = S_{A2} - S_{A1}$  ( $S_{A1}$ 为时段初土壤储水量, $S_{A2}$ 为时段末土壤储水量,单位:mm)。

有效降雨量:是指自然降水中可被土壤涵养转化为土壤水的部分,本文其计算方法为:

$$P_E = S_{Ac} - S_{Ac} + E_{TM} \quad (2)$$

式中, $S_{Ac}$ 雨后土壤储水量(mm); $S_{Ac}$ 为降雨前土壤储水量(mm); $E_{TM}$ 为降雨期间作物耗水量(mm),它等于降雨前一时段和后一时段耗水量与蒸发量比值的平均数乘以降雨期间的蒸发量,当降雨较小而不足以使土壤水分达到田间持水量时,则全部降水为有效,而不必使用式(2)来推求有效降雨量。

水分利用率:是指作物经济产量与耗水量之比,其公式为:

$$W_{UE} = Y_d / E_T \quad (3)$$

式中, $W_{UE}$ 为水分利用率(kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>); $Y_d$ 为作物经济产量(kg hm<sup>-2</sup>); $E_T$ 为作物耗水量(mm)。

氮肥利用率:采用基础产量-差减法进行,其表达式为:

$$F_{UE} = (U_N - U_C) / A_N \times 100 \quad (4)$$

式中, $F_{UE}$ 为氮肥利用率(%); $U_N$ 为施氮肥区地上植株氮积累量(kg hm<sup>-2</sup>); $U_C$ 为无氮肥区地上植株氮积累量(kg hm<sup>-2</sup>); $A_N$ 为氮肥施用数量(kg hm<sup>-2</sup>)。

本文土壤水分采用土钻取土,烘干法进行测定,土壤储水量测定深度为 1 m。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦生长期间的土壤水分状况和小麦农田耗水规律

2.1.1 小麦生长期土壤水分状况和灌溉调节土壤水分的作用 把灌溉与不灌处理各区 0~40(60)cm 土壤水分含量平均值绘制成图 1。可以看出,从 10 月下旬播种到翌年 3 月下旬,试验区土壤含水量一直维持田间持水量 75% 以上,没有低于下限指标。3 月下旬后,由于气温升高以及小麦进入营养生长与生殖生长并进阶段,生理需水迅速增加,棵间蒸发加大,土壤含水量下降较快,4 月 3 日测定已降至 188 g kg<sup>-1</sup>,低于下限指标,次日按试验设计对灌溉处理进行了灌水,灌水量为 450 m<sup>3</sup> hm<sup>-2</sup>。监测表明,灌水后土壤水分迅速升高,灌溉起到了较好调节土壤水分作用。而不灌处理直到 4 月 7 日~4 月 9 日一次降雨后,土壤水分才升到下限指标以上。4 月 17 日前后有一次较大降雨过程,4 月 22 日测定时不灌和灌溉处理土壤含水量分别为 233 g kg<sup>-1</sup>和 246 g kg<sup>-1</sup>,均在土壤水分下限指标之上。之后至 5 月 10 日,基本无雨。此时正值小麦扬花灌浆的生殖

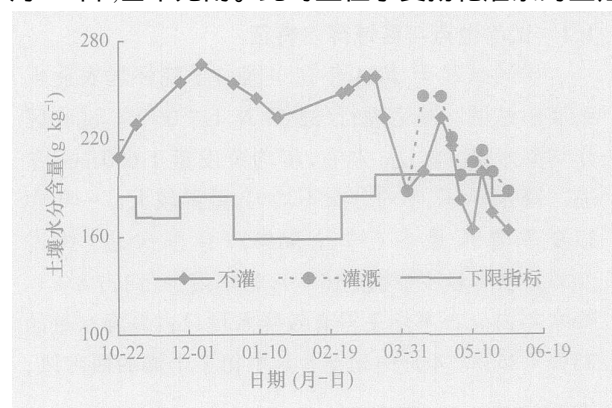


图 1 小麦生长期土壤水分状况  
生长旺盛期,气温也进一步升高,生理需水和棵间蒸

发进一步加大,土壤水分又迅速下降。5月3日测定不灌和灌溉处理土壤含水量分别为  $183 \text{ g kg}^{-1}$  和  $198 \text{ g kg}^{-1}$ ,前者已低于下限指标,后者接近下限指标,于是进行了第二次灌溉,灌水量为  $600 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ 。灌水后直到收获,灌溉处理土壤含水量一直在下限指标以上,不灌处理则继续下降,5月10日测定时已降至  $165 \text{ g kg}^{-1}$ ,只有田间持水量的60%,虽然5月12日一次较大降水(23.2 mm)后不灌处理土壤含水量有所上升,但仍低于下限指标,这种状况一直持续到收获。因此,灌溉起到了良好地调节土壤水分的作用,保证了小麦高产对水分的需求。

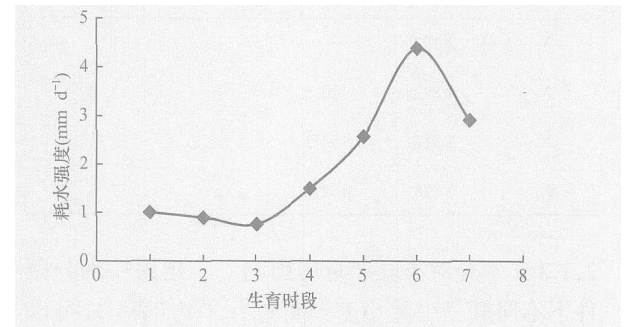
**2.1.2 降水对小麦耗水特征的影响** 小麦全生育期降水量为 305.9 mm,根据式(2)计算出有效降水量为 239.4 mm,占总降水量的 78.3%。根据式(1)计算出灌溉处理各区平均耗水量为 389.9 mm,有效降水只能满足耗水量的 61.4%,全生育期缺水 150.5 mm(表1)。根据对降水时间和强度记载,降水主要集中在播种到拔节前这段期间,达到 216.1 mm,占总降水量 70.6%,有效降水为 149.6 mm,占阶段降水量 69.2%,占总有效降水量 62.5%。从水分盈亏角度,这一时段的降水基本满足了小麦耗水需求。拔节直到成熟收获,降水明显偏少,这期间降水只有 89.8 mm,而小麦的耗水量高达 253.7 mm,有效降水只有耗水量的 35.4%,此时正值小麦的生殖生长阶段,如果水分供应不足,必将影响小麦产量。

表1 小麦生长期不同阶段水分收支状况  
(灌溉处理各区平均)

项目	降水量 (mm)	有效降水量 (mm)	耗水量 (mm)	水分盈亏 (mm)
播种出苗期	124.5	58.0	36.1	+21.9
分蘖期	18.6	18.6	26.8	-8.2
越冬期	46.6	46.6	46.3	+0.3
返青期	26.4	26.4	27.0	-0.6
拔节孕穗期	60.2	60.2	92.8	-32.6
抽穗灌浆期	26.2	26.2	131.8	-105.6
成熟期	3.4	3.4	29.1	-25.7
全生育期	305.9	239.4	389.9	-150.5

**2.1.3 小麦耗水规律** 作物耗水量包括作物蒸腾量和棵间蒸发量,而关于小麦生长过程耗水分析,已见诸大量文献报道<sup>[5~9]</sup>。一般认为,拔节至乳熟期对水分要求最为敏感,耗水量占全生育期 60%左

右。从本次试验灌溉处理所获得的小麦各生育时段耗水参数看(表1),播种至返青的营养生长阶段,由于个体较小,气温低,作物蒸腾量和棵间蒸发量也较低,小麦对水分的需求相对较少。这一时段耗水量约占全生育期 35%左右。拔节-开花-灌浆生殖生长阶段,随着气温升高,小麦生长加快,对水分需求迅速增加,这一生育时段的耗水量约占全生育期的 58%。小麦成熟阶段耗水量约占全生育期的 7%左右,比重较小。小麦各生育时段的耗水强度类似“S”型的变化规律(图2),耗水强度最低值出现在越冬期,最高值出现在抽穗灌浆期。



1. 播种出苗期;2. 分蘖期;3. 越冬期;4. 返青期;5. 拔节孕穗期;  
6. 灌浆期;7. 成熟期

图2 小麦各生育时段的日均耗水量(灌溉处理)

## 2.2 水肥配合对小麦产量的影响

**2.2.1 各处理产量与统计分析结果** 8个处理产量变化在  $2100 \sim 5876 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $N_1W_1$  产量最低,  $N_4W_2$  产量最高,是  $N_1W_1$  的 2.8 倍。统计分析表明,  $N_4W_2$  和  $N_3W_2$  间产量无显著差异,但与其他 6 个差异达极显著水平;  $N_4W_1$ 、 $N_3W_1$  和  $N_3W_2$  处理间产量差异不显著,与  $N_2W_1$ 、 $N_1W_2$ 、 $N_1W_1$  差异达极显著水平;  $N_2W_1$  和  $N_1W_2$ 、 $N_1W_1$  产量间差异达极显著水平;  $N_1W_2$  和  $N_1W_1$  产量差异不显著(表2)。

表2 不同处理小麦产量与统计分析

处理代号	产量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	Duncan 测验	
		$P_{0.05}$	$P_{0.01}$
$N_1W_1$	2100	d	D
$N_1W_2$	2274	d	D
$N_2W_1$	4599	c	C
$N_2W_2$	5045	b	B
$N_3W_1$	5220	b	B
$N_3W_2$	5813	a	A
$N_4W_1$	5179	b	B
$N_4W_2$	5876	a	A

**2.2.2 氮肥对小麦产量的影响** 将同一氮肥水平不同水分条件下小麦产量进行平均(表 3),可以看出,施氮有极其显著地增产效果,比不施氮肥处理提高 120.5%~152.8%。施氮处理间,由于氮肥用量不同,产量也有所差异。 $N_3$  (195 kg  $hm^{-2}$ ) 和  $N_4$  (270 kg  $hm^{-2}$ ) 产量差异较小,但比  $N_2$  (120 kg  $hm^{-2}$ ) 增产 14.5%左右,差异达极显著水平。

表 3 施氮的产量效应

施 N 水平	平均产量 (kg $hm^{-2}$ )	增产 (%)	Duncan 测验	
			$P_{0.05}$	$P_{0.01}$
$N_1$	2 187	—	c	C
$N_2$	4 822	120.5	b	B
$N_3$	5 517	152.3	a	A
$N_4$	5 528	152.8	a	A

**2.2.3 水分对小麦产量的影响** 把同一水分条件下不同氮肥用量小麦产量进行平均(表 4),可以发现,由于在小麦生长的中后期降雨偏少,靠自然降水无法满足小麦高产对水分的需求,不灌处理由于受到干旱的影响,产量明显比灌溉处理低。从产量平均结果看,灌溉比不灌增产 11.2%,统计上达到极显著水平,表明及时灌溉收到了明显地增产效果。

表 4 灌溉的产量效应

水分水平	平均产量 (kg $hm^{-2}$ )	增产 (%)	Duncan 测验	
			$P_{0.05}$	$P_{0.01}$
$W_1$ (不灌)	4 275	—	b	B
$W_2$ (灌溉)	4 752	11.2	a	A

**2.2.4 水、肥交互作用分析** 交互作用分析反映一个因素的各水平在另一个因素的不同水平中反应不一致的现象<sup>[10]</sup>。把不同施氮水平和水分条件下各处理交互作用进行比较,可以看出,施氮( $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ )结合灌溉( $W_2$ )比施氮不灌溉( $W_1$ )时增产幅度大,表现为正交互。因此,水肥配合有良好交互效应。

### 2.3 小麦对水肥的有效利用

**2.3.1 小麦对水分的有效利用** 根据式(3)计算出 8 个处理的水分利用率( $W_{UE}$ )见表 5。可以看出,施 N 肥后,小麦  $W_{UE}$ 比不施 N 肥处理增加 5.72~7.40 kg  $hm^{-2} mm^{-1}$ ,提高 84.4%~109.1%。灌溉条件下,小麦  $W_{UE}$ 有随施氮量增加而升高趋势。不灌溉条件下,小麦  $W_{UE}$ 以施氮 195 kg  $hm^{-2}$ 处理最高,施氮量继续增加, $W_{UE}$ 则降低。把两种水分条件下不同氮肥水平小麦  $W_{UE}$ 结果进行平均,可以看出,灌溉后小麦  $W_{UE}$ 比不灌处理略有提高。另外,不施氮肥情况下,灌溉处理  $W_{UE}$ 比不灌处理还要低,表明,在小麦上不施氮肥即使保证水分供应,也无法提高水分利用效率,从一个侧面也反映出水肥配合的重要性。

**2.3.2 小麦对氮肥的有效利用** 根据各处理籽粒、秸秆含 N 量测试分析结果和各自产量,计算出各处理吸收 N 量,运用式(4)计算出 3 个不同施氮水平在两种水分条件下 N 肥当季相对利用率(表 6)。结果表明,N 肥当季相对利用率在两种水分条件下均表现为随氮肥用量增加而逐渐降低,但不灌溉时降幅更大。从两种水分条件不同施氮水平 N 肥当季相对利用率平均结果也可以看出,灌溉比不灌高 4.8 个百分点,提高 11.5%,说明水肥配合对肥料利用率提高有良好作用。

表 5 各处理水分利用效率

N 肥水平	产量(kg $hm^{-2}$ )		耗水量(mm)		$W_{UE}$ (kg $hm^{-2} mm^{-1}$ )		
	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	平均
$N_1$ (0)	2 100	2 274	303.2	342.8	6.93	6.63	6.78
$N_2$ (120)	4 599	5 045	370.3	401.2	12.42	12.57	12.50
$N_3$ (195)	5 220	5 813	371.0	407.1	14.07	14.28	14.18
$N_4$ (270)	5 179	5 876	375.0	408.6	13.81	14.38	14.09
平均	4 275	4 752	354.9	389.9	12.05	12.19	

表 6 小麦对氮肥利用效率

N 肥水平	小麦吸收 N 量(kg hm <sup>-2</sup> )		其中对肥料 N 的吸收量(kg hm <sup>-2</sup> )		N 肥当季相对利用率(%)		
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	平均
N <sub>1</sub> (0)	63.8	73.3	—	—	—	—	—
N <sub>2</sub> (120)	129.0	142.2	65.2	58.9	54.3	57.4	55.9
N <sub>3</sub> (195)	142.7	164.6	78.9	91.3	40.5	46.8	43.7
N <sub>4</sub> (270)	144.8	168.0	81.0	94.7	30.0	35.1	32.6

### 3 结 论

1) 受气候因素、土壤物理性状以及小麦需水特征影响,我国淮北地区小麦生长期内阶段性缺水现象明显。本次试验期间小麦全生育期缺水 150.5 mm,生理干旱主要出现在小麦生长的中后期。

2) 适时进行灌溉不仅可以提高小麦产量、改善小麦经济性状,同时能显著促进 N 肥肥效,提高小麦的 N 肥相对利用率 4.8 个百分点。

3) 小麦生长期补充灌溉过程中,水肥配合不仅具有明显的增产效果,而且适量使用 N 肥能显著提高小麦在生长期内水分利用效率。

本研究的试验结果可望对淮北变性土地区小麦高产稳产的水肥管理实践提供重要参考。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 孙怀文. 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系. 土壤学报, 1993, 30(4): 423 ~ 431
- [ 2 ] 詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制. 土壤学报, 2003, 40(3): 420 ~ 425
- [ 3 ] 顾建明. 淮北涡河流域旱作灌溉与粮食生产. 见: 周明枞, 姚培元主编. 淮北地区水土资源开发与治理研究. 北京: 科学出版社, 1992. 21 ~ 28
- [ 4 ] 毛锐. 淮北涡河地区水旱灾害特点及治理对策. 见: 周明枞, 姚培元主编. 淮北地区水土资源开发与治理研究. 北京: 科学出版社, 1992. 11 ~ 20
- [ 5 ] 赵炳梓, 徐富安, 周刘宗, 等. 水肥(N) 双因素下的小麦产量及水分利用率. 土壤, 2003, 35(2): 122 ~ 125
- [ 6 ] 孟兆江, 贾大林. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究. 农业工程学报, 1998, 14(1): 86 ~ 90
- [ 7 ] Zhou L Y, Chen Z X. Study on rational irrigation for wheat production in Fengqiu region I. Analysis of the relation between soil water supply and wheat yield. Pedosphere, 1997, 7(3): 251 ~ 256
- [ 8 ] Zhou L Y, Chen Z X. Study on rational irrigation for wheat production in Fengqiu region II. A model of rational irrigation for wheat and its evaluation. Pedosphere, 1997, 7(4): 311 ~ 316
- [ 9 ] 许越先. 我国节水农业研究的主要趋势. 见: 许越先主编. 节水农业研究. 北京: 科学出版社, 1992. 1 ~ 13
- [ 10 ] 南京农业大学主编. 田间试验和统计方法. 北京: 农业出版社, 1988