

不同灌溉水平对冬小麦耗水构成及利用效率的影响

孔箫铤, 张海林, 宋振伟, 陈 卓

(中国农业大学农学与生物技术学院/农业部作物栽培与耕作学重点实验室, 北京 100193)

摘 要: 以北京地区为典型区域, 设计 5 种不同灌溉处理, 即按照生育时期分别进行无灌溉、灌 1 水、灌 2 水、灌 3 水及灌 4 水处理, 利用中子仪和水分平衡法测定冬小麦耗水量, 分析全生育期和关键时期的耗水特征。结果表明: 冬小麦全生育期耗水量随灌溉次数增加呈增大趋势, 拔节~抽穗期的耗水量最大, 耗水量最少时期为苗期; 随着灌溉次数的增加, 土壤水消耗量逐渐减少; 降水、灌溉和土壤供水是冬小麦耗水的主要来源, 降水较少年份土壤供水和降水在耗水构成中所占比例较大, 而降水较多年份冬小麦耗水的主要来源为降水; 随着灌溉量的增加, 灌溉逐渐成为冬小麦耗水构成的主要部分; 产量随着耗水量增加渐次增加, 水分利用效率和灌溉水利用效率则呈降低趋势。

关键词: 冬小麦; 耗水构成; 土壤水; 水分利用

中图分类号: S512.1⁺1; S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0037-05

水资源短缺是未来中国农业发展的主要限制因素^[1-3]。我国北方干旱地区有耕地 0.34 亿 hm^2 , 占全国耕地 1/3, 其中, 0.23 亿 hm^2 因水资源短缺无法灌溉^[4]。由于降水时空分布不均, 降水期与作物需水期错位, 这些地区作物的降水利用效率仅为 3~6 $\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ ^[5]。2005 年, 北京市农业用水为 13.2 亿 m^3 , 占该市总用水量的 38%, 种植业用水占农业用水的 78.7%^[6]。国内外研究证明, 对于降雨 250~500 mm 地区充分利用降水是农业可持续发展的根本途径^[7]。冬小麦是北方主要农作物, 同时也是高耗水作物之一, 整个生长季需水量在 450 mm 左右^[8,9], 小麦灌溉用水约占北方农业用水总量的 70%^[10]。大量研究结果表明^[11-13], 供水时期直接影响到水分利用效率, 不同生育阶段缺水对作物产量的影响不同, 需水关键期水分亏缺可能导致较大的减产。限量灌水不但能提高产量, 还能在一定程度上提高水分生产率^[14-18]。康绍忠等^[1,19]研究指出, 有效协调冬小麦对降水、灌溉水及土壤水分的利用, 是提高冬小麦灌溉效率与水分利用效率的关键^[20]。

目前的研究侧重对冬小麦耗水量及水分利用效率方面的研究, 较少分析不同降水年型全生育期及各个关键时期耗水构成, 即消耗水分包括哪些部分, 各部分水分所占的比例等。本文以北京通州区为例, 重点分析不同灌溉水平下冬小麦全生育期及关

键生育期的耗水构成情况, 并比较其水分利用效率, 以期优化当前灌溉制度, 提高冬小麦水分生产效率, 提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2006~2008 年在北京通州区农业试验基地进行。该地区多年平均气温 11.7℃, 多年平均降水量 546.5 mm, 冬小麦生育期多年平均降水量 171.7 mm。2006~2007 年、2007~2008 年年降水量^[21]分别为 177.1 mm、280.1 mm, 与常年相比, 2006~2007 年增加 3.1%, 为降水平常年份, 2007~2008 年增加 63.1%, 为降水较多年份。

参试冬小麦品种为农优 3 号, 于 10 月上旬播种, 次年 6 月中旬收获。根据冬小麦生长期不同灌溉次数将试验设计为 5 个处理(表 1); 小区排列采用随机区组设计, 4 次重复, 共 20 个小区, 小区面积 40 m^2 (8 m×5 m), 小区间设 1 m 隔离带, 以防止小区间水分侧渗。小区灌溉采用低压管道畦灌, 水量通过出水管口的水量表控制。除灌溉水处理外, 小麦生长期其他管理措施完全一致。

田间具体管理措施为: 播量 300 kg/hm^2 , 行距 20 cm, 小区行数为 25 行, 播深 5 cm。播前底施辛硫磷防治地下害虫, 开沟条播。按照 225 kg/hm^2 施用含氮量 46% 的尿素以及含氮量 18% 的二铵作为底肥,

收稿日期: 2008-10-14

基金项目: “948” 引进项目 (2006-G52(B)); 2008 年公益性行业 (农业) 科研专项 (200803028); 北京市农业学科群建设项目 (XK100190553)

作者简介: 孔箫铤 (1980—), 男, 云南通海人, 硕士研究生, 研究方向为节水农作制。E-mail: caukqx@gmail.com.

通讯作者: 陈 卓, 男, 教授, 博士生导师。

4月下旬按照 225 kg/hm² 追施含氮量 46% 的尿素。按照乐果 1.5 kg/hm²、敌敌畏 0.75 kg/hm² 喷施农药,以防治蚜虫。

为便于研究,将冬小麦生育时期统一划分为苗期(10月12日~11月27日)、越冬~返青(11月28日~次年4月14日)、拔节~抽穗(4月15日~5月15日)、灌浆~成熟(5月16日~6月15日)4个阶段进行分析。

表 1 冬小麦灌溉处理方案

Table 1 The scheme of winter-wheat irrigation treatments

处理 Treatments	灌溉量(mm) Irrigation			
	越冬 Wintering period	返青 Turning green period	拔节 Jointing stage	灌浆 Filling stage
T0	0	0	0	0
T1	0	0	50	0
T2	50	0	50	0
T3	50	50	50	0
T4	50	50	50	50

1.2^{*} 试验方法

1.2.1 土壤含水量 播种时进行基础土壤水分测定,以后每隔 10 d 测定 1 次,测定深度为 0~140 cm,其中 0~40 cm 每 10 cm 一个层次,40~140 cm 每 20 cm 一个层次。降雨和灌溉前后加测土壤水分。测

定仪器为 CNC505DR 智能型土壤中子水分仪。

1.2.2 作物耗水量 采用水分平衡分析方法^[21,22]。因试验田较平坦,且北京平原地区平均地下水埋深 20 m,未考虑地下水影响及地表径流渗漏,修正土壤水分能量方程为:

$$ET = P + I + \Delta W$$

式中,ET 为作物耗水量(mm);P 为生育期内降水量(mm);I 为生育期内的灌溉量(mm); ΔW 为土壤水分消耗量(初期土壤含水量与末期土壤含水量的差,mm)。

1.2.3 水分利用效率和灌溉水利用效率^[23,24] 采用产量水平上的计算公式为:

$$WUE = Y/ET$$

$$WUE_i = Y/I$$

式中,WUE 和 WUE_i 分别为水分利用效率、灌溉水利用效率(kg/m³);Y 为作物的经济产量(kg/hm²);ET 为作物耗水量(mm);I 为灌溉量(mm)。

1.2.4 数据分析 试验数据采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉水平下全生育期耗水量比较

不同灌溉水平下冬小麦全生育期耗水总量及构成见表 2。

表 2 冬小麦全生育期耗水总量及构成分析

Table 2 The total water consumption and composition of winter-wheat during its growth season

年份 Year	处理 Treatments	总耗水量 (mm) Total water consumption	降水量(mm) Precipitation	灌溉水量 (mm) Irrigation amount	土壤水分消耗 (mm) Soil water consumption	占总耗水量的比例(%) Rate in total water consumption		
						降水 Precipitation	灌溉 Irrigation	土壤供水 Soil water supply
2006~2007	T0	248.2c	115.2	0	133a	46.4	0.0	53.6
	T1	279.2bc	115.2	50	114ab	41.3	17.2	40.8
	T2	285.2bc	115.2	100	70b	40.4	35.1	24.5
	T3	371.2ab	115.2	150	106ab	31.0	40.4	28.6
	T4	416.2a	115.2	200	101ab	27.7	48.1	24.3
2007~2008	T0	297.1e	157.4	0	139.7a	53.0	0.0	47.0
	T1	345.4d	157.4	50	138.0a	45.6	14.5	40.0
	T2	384.1c	157.4	100	126.7a	41.0	26.0	33.0
	T3	439.3b	157.4	150	131.9a	35.8	34.1	30.0
	T4	473.2a	157.4	200	115.8a	33.3	42.3	24.5

注:T0-无灌溉处理;T1-灌水 50 mm;T2-灌水 100 mm;T3-灌水 150 mm;T4-灌水 200 mm;同一列中不同字母表示差异达显著($P < 0.05$)水平。下同。

Note: T0 - Non-irrigation treatment; T1 - Irrigation(50 mm); T2 - Irrigation(100 mm); T3 - Irrigation(150 mm); T4 - Irrigation(200 mm); different letters in the same column mean significance of difference at 0.05 level ($P < 0.05$). The same as below.

可以看出生育期两种降水年份下,不同灌溉水 平冬小麦总耗水量变化趋势一致:随着灌溉量的增

加,耗水量呈增长趋势。其中 2007~2008 年不同灌溉处理间差异均达显著水平,从耗水构成看,随着灌溉水量的增加,灌溉水逐渐成为冬小麦耗水来源的主体,降水和土壤供水所占比例则呈降低趋势。相比较而言,2007~2008 年降雨占总耗水量的比例明显高于 2006~2007 年,土壤供水所占比例则低于 2006~2007 年。无灌溉水平下,2006~2007 年降水和土壤供水所占比例为 46.4%、53.6%,而 2007~2008 年为 53.0%、47.0%。说明降水正常年份土壤供水是冬小麦耗水的最主要来源,降水较多年份降水是其耗水来源的主体,两种降水年份下灌溉水在冬小麦耗水构成中的作用均不可忽视。

2.2 不同灌溉水平下生育关键时期耗水特征

不同灌溉处理下,冬小麦各个生育期的耗水量存在差异(表 3)。降水不同年份下冬小麦各生育期耗水量在拔节~抽穗期均最大(尤其以拔节期耗水量所占比例大),耗水量最少的时期是苗期,全生育期耗水量总体呈正态分布曲线变化。各生育期耗水特征基本呈现:拔节~抽穗期各处理间无显著差异,其余时期灌水和无灌水存在显著差异,灌水处理中灌水 50 mm 与其它处理存在显著差异,其他处理间差异不显著。

表 3 不同灌溉处理下冬小麦关键生育期水分利用情况(mm)
Table 3 Water use of winter-wheat in the key growth period under different irrigation treatments

年份	处理	苗期	越冬~返青	拔节~抽穗	灌浆~成熟
Year	Treatments	Seedling	Wintering to turning green	Jointing to heading	Filling to ripening
2006~2007	T0	66.1a	62.9b	87.0a	32.2a
	T1	-0.9b	78.9b	100.0a	101.2a
	T2	-77.9b	175.9a	105.0a	82.2a
	T3	-51.9b	205.9a	124.0a	93.2a
	T4	-55.9b	185.9a	120.0a	166.2a
2007~2008	T0	29.3a	101.8b	132.8a	33.2b
	T1	3.6a	83.5b	131.5a	126.8ab
	T2	12.7a	179.6a	176.2a	15.6ab
	T3	-9.5a	212.3a	197.8a	38.6ab
	T4	11.8a	190.4a	187.0a	84.1a

注:“-”代表水分补给。Note:“-” Water supply.

苗期冬小麦叶面积小,水分消耗主要用于株间土壤蒸发,所耗水量较少。2006~2007 年灌水处理中大部分土壤水分消耗都出现了负值,说明降水量较少年份土壤供水是冬小麦耗水的主要来源。2007~2008 年灌水 50 mm、150 mm 与 100 mm 处理间存在显著差异。两种降水年份下无灌水处理中土壤供

水所占比例较高;灌水处理中随着灌溉水量增加,灌溉水逐渐成为冬小麦耗水的主要来源。说明与无灌溉相比,灌溉更有利于土壤水分的增加,减少了生育阶段小麦对土壤水的利用。

越冬~返青期小麦叶面积迅速增大,营养生长持续时间长,同时地表冻融使得土壤疏松,地面蒸腾量增大,这种现象在拔节后期表现尤为突出,小麦耗水呈明显增加,因此农事操作中应该加大在该时期的灌溉量。从耗水构成看,该时期无灌溉的处理中降水是其耗水的主要来源,有灌溉的处理耗水主要来源为灌溉。

拔节~抽穗期是冬小麦耗水量最大的时期。各处理间耗水量无显著差异。从耗水构成看,土壤供水是耗水的主要来源。随着灌溉量的增加,灌溉在总耗水中所占比例逐渐升高。

灌浆~成熟期仅灌水 200 mm 处理有灌水进入土壤,其余处理中降水均是耗水构成的主要部分,所占比例均大于 50%。

2.3 不同灌溉水平的土壤水消耗特征

图 1 是不同灌溉水平下,从播种至收获冬小麦整个生育期内的土壤水消耗情况。分析可知不同灌溉处理直接影响到土壤水的利用程度,当无灌溉或者灌溉水量较少时,作物根系深扎吸取深层水占较大比例,灌溉水量较多时,作物主要消耗表层水。

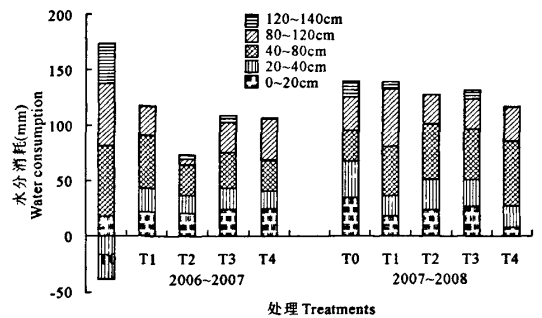


图 1 不同灌溉水平下冬小麦消耗土壤水垂直分布

Fig.1 Vertical distributions of winter-wheat soil water consumption under different irrigation levels

结果表明,不同降水年份下随着灌溉水量的增加,0~140 cm 内土壤水的利用量逐渐降低。两种降水年份下 0~80 cm 土壤水利用率随着灌溉次数增加而增加,尤其以 40~80 cm 土层为最大。但是随着土壤深度的增加,无灌水处理 80 cm 以下的土壤水利用率却远远高于其他处理,其原因是根的向水性,由于灌溉次数增加,表层土壤湿润,使得根系多生长在表层,而灌水较少,土壤表层水分少,根系便下扎

吸取深层土壤水和肥^[25]。

2.4 不同灌溉水平的水分利用效率比较

表 4 是不同灌溉水平冬小麦水分利用和产量结果。试验结果表明,冬小麦的经济产量与耗水量间存

在十分密切的关系,二者建立拟合方程为: $Y = -0.0674ET^2 + 68.407ET - 11378$ 。其中, Y 为经济产量(kg/hm^2), ET 为耗水量(mm), 相关系数为 0.8515。

表 4 不同灌溉水平下冬小麦产量与水分利用效率比较

Table 4 Comparison of yield and water use efficiency of winter-wheat under different irrigation levels

年份 Year	总灌水量 Total irrigation (mm)	总耗水量 Total water consumption(mm)	籽粒产量 Yield (kg/hm^2)	水分利用效率 Water use efficiency (kg/m^3)	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency (kg/m^3)
2006 ~ 2007	0	248.2c	1312c	0.53b	—
	50	279.2bc	3863b	1.38a	7.73a
	100	285.2bc	5646a	1.98a	5.65b
	150	371.2ab	5650a	1.52a	3.77c
	200	416.2a	5865a	1.41a	2.93c
2007 ~ 2008	0	297.1e	3281d	1.10a	—
	50	345.4d	4570c	1.32a	9.14a
	100	384.1c	5234bc	1.36a	5.23b
	150	439.3b	5703ab	1.30a	3.80c
	200	473.2a	6133a	1.30a	3.07c

注:同一列中不同字母表示差异达显著($P < 0.05$)水平。

Note: Different letters in the same column mean significance of difference at 0.05 level ($P < 0.05$).

无灌水和灌水处理产量存在显著差异,2007 ~ 2008 年表现更为明显。2006 ~ 2007 年无灌水和灌水处理水分利用效率存在显著差异,2007 ~ 2008 年则差异不明显。随着灌水量的增加,WUE 呈下降趋势。无灌溉处理的 WUE 最低,WUE 最高的处理不是灌水 200 mm 的,而是灌水 100 mm 的处理,说明一定程度的水分胁迫可以提高作物的 WUE。灌溉水利用效率则随着灌水量增加呈现明显降低趋势,灌水 150 mm 和 200 mm 处理间差异不显著。

3 结 论

生育期降水不同年份下,不同灌溉水平冬小麦耗水量随着灌溉次数的增加呈增大趋势,降水较多年份下差异显著。各生育期耗水存在差异,拔节 ~ 抽穗期耗水量最高,耗水量最少时期出现在苗期,全生育期耗水量总体呈正态分布曲线变化。

降水、灌溉和土壤供水是冬小麦耗水的主要来源。降水较少年份,无灌溉或灌溉量较少时,降水和土壤供水在全生育期耗水构成中所占比例较大;降水较多年份,冬小麦耗水的主要来源是降水。随着灌溉量的增加,灌溉逐渐成为冬小麦耗水构成的主要部分。

不同灌溉处理下冬小麦对不同层次土壤水的利用存在差异,无灌溉或灌溉量少时,冬小麦主要利用深层土壤水,但是灌溉次数增加后,则主要利用表层

土壤水。

冬小麦水分利用效率与耗水量间存在密切关系,随着耗水量增加其 WUE 逐渐降低。灌水 100 mm 处理的水分利用效率最高,灌水 50 mm 处理的灌溉水利用效率最大。降水较多年份整体产量显著提高的事实,充分说明水分在冬小麦生长发育中的重要作用。随着水分利用效率的提高,产量逐渐增加,但是灌水次数并非越多越好。在产量相同或相近时,采取合理节水灌溉,能够有效节水增产。

参 考 文 献:

- [1] 高志红,陈晓远,罗远培. 不同土壤水分条件下冬小麦根、冠平衡与生长稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 540—548.
- [2] Brown L R, Halweil B. China's water shortage could shake world food security[N]. World watch, 1998, (7-8): 10—18.
- [3] 刘翼浩. 水:我国可持续发展的战略重点[N]. 科技日报(第一版), 1998-09-12.
- [4] 赵聚宝,李克煌. 干旱与农业[M]. 北京:中国农业出版社, 1995: 352—368.
- [5] 蔡焕杰,王 健,王刘栓. 降雨聚集条件下节水高效农业综合技术[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 78—83.
- [6] 张凤荣,陈 阜. 都市型现代农业产业布局[M]. 东营:中国石油大学出版社;北京:中国农业大学出版社, 2007.
- [7] 张祖新. 我国北方雨水集蓄与节水灌溉技术[J]. 节水灌溉, 2000, (3): 13—14.
- [8] English M, Raja S N. Perspectives on deficit irrigation[J]. Agricul-

- tural Water Management, 1996, 32: 1—14.
- [9] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮海冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 577—585.
- [10] 兰林旺, 周殿玺. 小麦节水高产研究[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- [11] Rao N, et al. Irrigation scheduling under a limited water[J]. Agricultural Water Management, 1998, 15(2): 25—32.
- [12] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27—32.
- [13] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67—74.
- [14] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 208—214.
- [15] 张正斌, 山仓. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 73—78.
- [16] 石元春, 刘昌明, 龚元石. 节水农业应用基础研究进展[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [17] 兰霞, 周殿玺, 兰林旺. 灌溉制度对冬小麦产量结构形成与产量物质来源的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(1): 17—22.
- [18] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 41—44.
- [19] 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 曹云者, 宇振荣, 赵同科. 夏玉米需水及耗水规律的研究[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 47—50.
- [21] 信乃谏. 计算农田蒸发的水量平衡法[J]. 干旱地区农业研究, 1986, 4(2): 37—43.
- [22] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰, 等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [23] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 46—50.
- [24] 李远华, 赵金河, 张思菊, 等. 水分生产率计算方法及其应用[J]. 中国水利, 2001, (8): 65—66.
- [25] 李远华, 王晓玲, 段爱旺, 等. 2006年全国灌溉试验站网成果汇编[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.

Effect of irrigation on water consumption composition and use efficiency of winter wheat

KONG Qing-xin, ZHANG Hai-lin, SONG Zhen-wei, CHEN Fu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: Quantitative analysis was made of the situation of soil water use, water consumption composition during its growth seasons and key stages as well as water use efficiency(WUE) under different irrigation levels in different rainfall years. Taking Beijing as the typical region, five different irrigation treatments were designed (non-irrigation, irrigation 50 mm, irrigation 100 mm, irrigation 150 mm and irrigation 200 mm) according to the growth periods of winter wheat, water consumption was determined with neutron probe and water balance method. Then water consumption character of winter wheat in its growth seasons and key ages was analyzed. The results showed that water consumption of winter wheat became larger while increasing irrigation, the largest stage was the jointing and heading stage, and the seeding stage was the least. Soil water consumption reduced when increasing irrigation. Rainfall, irrigation and soil water supply were the chief sources of winter wheat water consumption, the rate of rainfall and soil water supply was larger in less rainfall year, but rainfall was its main source in rainy year. Water from irrigation became the chief part while increasing irrigation. The yield of winter wheat increased, but water use efficiency (WUE) and irrigation water use efficiency (WUEi) reduced while irrigation increasing. The results show that there are differences in water consumption composition and use efficiency of winter wheat during its growth seasons and key stages under different irrigation levels.

Key words: winter wheat; water consumption composition; soil water; water use