

灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响

黄玲¹, 高阳¹, 邱新强², 李新强¹, 申孝军¹, 孙景生¹, 巩文军³, 段爱旺^{1*}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453003; 2. 河南省水利科学研究院; 郑州 450003; 3. 河南省焦作市广利灌区管理局, 沁阳 454550)

摘要:为明确品种更替过程中冬小麦的耗水特性、产量和水分利用效率(WUE)的变化规律,以及对水分胁迫的响应,于2010—2012两个生长季选取河南中北部建国以来不同年代的7个主栽品种为试验材料,在田间设置三个水分处理下(W0,返青后不灌水;W1,拔节期灌水;W2,拔节和灌浆期分别灌水),研究了冬小麦的耗水特性、产量构成因素、收获指数和水分利用效率的变化过程。研究结果表明:在冬小麦更替过程中,冬小麦总耗水和土壤贮水消耗与年代差异不显著,而受降雨和灌溉影响较大。从20世纪50年代至现在,90年代及以后的冬小麦品种千粒重在41 g以上,明显高于早期品种。两年生长季冬小麦籽粒产量增加58.4%和41.8%,平均每次更替增加396和362 kg/hm²;收获指数增加37.0%和18.0%,平均每次更替增加0.2和0.1;WUE增加55.3%和40.8%,平均每次更替增加0.11和0.10 kg/m³。现代品种源、库关系得到改善,千粒重大幅度增加和收获指数增加是籽粒产量提高的主要原因。籽粒产量和WUE由品种和水分互作效应决定,在拔节期和灌浆期灌水可明显提高籽粒产量水平,并在一定程度上提高了水分利用效率。

关键词:灌溉,土壤,水分,冬小麦,农艺性状,耗水特性,籽粒产量,水分利用效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.013

中图分类号: S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0099-10

黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.

Huang Ling, Gao Yang, Qiu Xinqiang, et al. Effects of irrigation amount and stage on yield and water consumption of different winter wheat cultivars[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 99-108. (in Chinese with English abstract)

0 引言

水资源的日益短缺,已经成为制约冬小麦生产可持续发展的重要因素,而提高农田水分利用效率是解决冬小麦生产的根本途径^[1-2]。因此,充分利用环境水与最大限度地节约作物本身用水相结合已成为节水农业中关注的热点。冬小麦的水分利用效率受遗传因素、生态环境因素及栽培措施的共同影响。已有的研究表明,不同基因型小麦品种的耗水特性、产量和水分利用效率之间存在较大的差异,产量和水分利用效率差异能达到44.86%和

42.18%^[3],而灌水时期和灌水量也会显著影响小麦的籽粒产量和水分利用效率^[4-7]。

已有研究表明,作物更换一次良种一般可增产10%左右^[8]。随着品种的不断更替,冬小麦单位面积的产量和品质都在不断提高,由于受土壤、气候、栽培措施等条件的影响,冬小麦品种特征特性的演替规律结果不尽一致,表现在小麦限制产量因素结论的不同。有研究认为在小麦品种更替过程中,籽粒产量增加是因为千粒重增加,而穗数无相应增加^[9],穗粒数也明显增加^[10-13];但也有研究认为产量提高主要依赖于粒数的增加而不是千粒重的增加^[14-16]。许为钢^[17]等研究认为小麦产量的提高得益于生物产量和收获指数的提高;而刘和琴等^[18-19]则认为收获指数和千粒重的提高对产量起重要作用,而生物产量、单株穗数和单株籽粒产量则未有提高。随着年代的增加,小麦品种的水分利用也有相应的变化,景蕊莲等^[20-21]研究认为80年代品种的抗旱性要低于当地早期品种。也有研究认为在品种更替过程中,品种的抗旱能力在逐步加强,水分利用效率呈降低的趋势,但具有广泛的水肥适应性的品种可以表现出较高的叶片水分利用效率^[22]。

收稿日期: 2012-11-01 修订日期: 2013-07-01

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-1-30);国家“863”计划资助项目(2011AA100509, 2011AA100502);公益性行业(农业)科研专项(201203077)

作者简介: 黄玲(1976—),女,甘肃兰州人,博士生,主要从事作物水分生理与高效用水研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室,453003。

Email: holly7681@163.com

*通信作者: 段爱旺(1963—),男,山西黎城人,研究员,博士生导师,主要从事作物水分生理与高效用水研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室,453003。

Email: duanaiwang@aliyun.com

河南省是中国冬小麦的主产区,同时也是中国优质小麦种植的优势区域,常年种植面积 470 万 hm^2 以上,约占全国小麦种植面积的 20%,总产量约占全国的 1/4,且以半冬性小麦品种为主^[23]。但该地区水资源严重不足,降水稀少和时空分布不均对冬小麦的生长发育和生产力稳定造成了很大影响。自建国以来冬小麦品种经历了 9~10 次更替^[24],小麦的产量性状和一些生理生态指标得到改进,丰产潜力提高。但针对适应本地区冬小麦品种更替过程中耗水特性和 WUE 演变趋势方面系统研究较少。鉴于此,本研究选择了建国以来河南省中北部主栽培品种中 6~7 个有代表性的品种,较系统的研究了不同水分处理下冬小麦耗水特性、产量构成及 WUE 的演变特征,旨在寻找本地区冬小麦更替过程中产量提高的水分利用机制,并从中寻找可循规律,对选育水分高效利用材料并扩大其遗传差异和正确制定小麦节水抗旱育种目标及指导农业生产中有限水资源的优化分配意义重大。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2010—2012 年两个冬小麦生长季在河南省焦作市广利灌区灌溉试验站(112°55'E, 35°40'N, 海拔 150 m)进行。试验点属温带湿润半湿润季风气候区,多年平均气温 14.5℃,多年平均降水量 593.5 mm,6—9 月降水量占全年降水量的 70%以上,多年平均蒸发量 1 774.8 mm(直径为 20 cm 的水面蒸发皿测定值),约为多年平均降水量的 3 倍。试验地土地平整,土壤质地为粉砂质粘土,土质分布均匀,在该地区具有代表性。耕层土壤(0~30 cm)有机质含量为 8.8 g/kg,全氮 0.86 g/kg,碱解氮 67.4 mg/kg,速效磷 11.1 mg/kg,速效钾 62.8 mg/kg。0~100 cm 土层田间持水率 26.00%(重量含水率),饱和含水率为 30.38%(重量含水率)。0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层的容重测定结果为:1.40、1.46、1.44、1.42 和 1.47 g/cm^3 。试验期间平均地下水位埋深为 6.4 m,最小埋深 5.6 m,最大埋深 7.1 m。两个试验年份冬小麦生长季内的降水和灌水情况见表 1。

表 1 冬小麦不同生育期的灌溉量和降雨量

Table 1 Irrigation quota and rainfall at different growth stages of winter wheat

mm

生长季 Season	处理 Treatment	播种~越冬 Sowing to overwintering 10-11—11-30	越冬~返青 Overwintering to revival 12-01—02-25	返青~拔节 Revival to jointing 02-26— 03-31	拔节~开花 Jointing to flowering 04-01—04-30	开花~成熟 Flowering to maturity 05-01—06-10	总灌溉量 Total irrigation amount	总降雨量 Total rain amount
2010—2011	W0	9.7+70	26.5	3.8	15.2	36.5	70	91.7
	W1	9.7+70	26.5	3.8	15.2+60	36.5	130	91.7
	W2	9.7+70	26.5	3.8	15.2+60	36.5+60	190	91.7
2011—2012	W0	132.2+40	11.0	36.6	19.3	3.3	40	172.3
	W1	132.2+40	11.0	36.6	19.3+50	3.3	90	172.3
	W2	132.2+40	11.0	36.6	19.3+50	3.3+50	140	172.3

注: + 后的数字表示灌溉量。

1.2 试验材料与设计

通过 2009—2010 年的初步试验,并于 2010 年冬小麦播种时正式开始田间试验,选择河南中北部地区建国以来不同年代具有代表性的 6 个冬小麦品种作为供试材料(表 2),2011—2012 年生长季又增加了中筋品种“周麦 22”(ZM22)。试验采用裂区设计,水分为主区,设置 3 个处理:1)返青后不灌水,冬小麦完全依靠自然降水生产(W0);2)拔节期灌一次水(W1);拔节期和灌浆期分别灌一次水(W2),每次灌水的灌水定额见表 1 加号后面的数字;品种为副区,2010—2011 年 6 个品种,每个处理重复 3 次,共计 54 个试验小区。2011—2012 年 7 个品种,每个处理重复 3 次,共计 63 个小区。田间试验小区长 8.0 m、宽 2.2 m,畦埂宽 40 cm,高 20 cm。小区四周挖 1 m 深的窄沟埋设油毡及塑料布,用于防止水分的侧向渗透。冬小麦分

别于 2010 年 10 月 11 日和 2011 年 10 月 18 日播种,播量 112.5 kg/hm^2 ,行距 20 cm,播前基施复合肥(N25-P8-K7) 750 kg/hm^2 ,拔节期追施尿素 150 kg/hm^2 。于 2011 年 6 月 10 日和 2012 年 6 月 2 日收获。试验区灌溉水源为地下水,灌水方式为地面灌溉,灌水量用水表计量。各试验小区的施肥、除草、病虫害防治等田间管理措施均与当地的高产田完全一致。

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 土壤含水量的测定

土壤含水量采用取土烘干法测定,每 10 d 采用取土烘干法测定 0~100 cm 土层的土壤含水量,每 20 cm 分层测定,降水后及灌溉前后均加测一次。

1.3.2 作物耗水量、耗水模系数和日耗水强度

试验小区内的小麦耗水量采用水量平衡法计算。由于试验小区地势平坦,两个试验年份小麦生育期间

降雨强度和降水总量都不大, 小区之间也设置有畦埂阻隔, 因此未观测到任何地表径流的流入与流出, 故地面径流量计为零。另外, 冬小麦生育期间试验区地下水埋深均大于 6 m, 因此生长季地下水补给量可计为零; 降水量不大, 入渗深度没有超过 1 m, 经达西定律计算, 深层耗水量可忽略不计。因此, 计算确定冬小麦耗水量的水分平衡方程可以简化为下式

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

式中, ETa 为作物耗水量, mm; 主要由植株蒸腾量与棵间蒸发量组成; P 为降水量, mm; I 为灌溉

量, mm; ΔW 为计算时段初与计算时段末土壤贮水的变化量。土壤贮水量用下式计算

$$W=0.1 \times r \times v \times h$$

式中: W 为土壤贮水量, mm; r 为土壤质量含水率, %; v 为土壤平均干容重, g/cm^3 ; h 为土层深度, cm; 0.1 为换算系数。

耗水模系数用下式计算: 耗水模系数=某生育阶段的耗水量/全生育期总耗水量 $\times 100\%$;

日耗水强度用下式计算: 日耗水强度=某生育阶段耗水量/生育阶段的天数 (mm/d)。

表 2 供试冬小麦品种基本情况

Table 2 Information of winter wheat cultivars used in the experiment

世代 Generation	年间 Period	品种 Cultivars	特性 Characteristics	种植情况 Planting information
2	1954—1962	西农 6028 (XN6028)	弱冬性, 中熟	关中、晋南、豫西、豫南等地 最大面积达 30.7 万 hm^2
3	1963—1972	丰产 3 号 (FC3)	弱冬性, 中熟	60 年代末在关中和黄淮冬麦区 种植面积最大的品种
4	1973—1980	矮丰 3 号 (AF3)	弱冬性, 较晚熟	70 年代至 80 年代初高产栽培的主要品种
5	1981—1988	百农 3217 (BN3217)	弱冬性, 中早熟	80 年代在黄淮麦区种植面积 233 多万 hm^2
7~8	1993—2001	豫麦 18 (YM18)	偏春性, 早熟	90 年代在河南省内种植 143 万 hm^2
9~10	2002—	郑麦 9023 (ZM9023)	弱春性, 早熟	2002 和 2003 年播种面积位居全国第一
10	2009—	周麦 22 (ZM22)	半冬性, 中熟	2011 年河南省种植面积 73.3 万 hm^2

1.3.3 产量及产量构成因素

冬小麦收获后, 在每个试验小区内都选取 3 个有代表性的 $1 m^2$ 样方, 用小区脱粒机脱粒并经自然风干后 (平均含水率约为 8.0%) 称质量, 并折算成每公顷的产量。计量确定 3 个样方的平均有效穗数并推算出亩穗数, 同时每个小区随机选取 10 株样品, 调查穗粒数, 在脱粒后风干的籽粒中随机取样测定千粒重, 重复 3 次, 取其平均值使用。

1.3.4 水分利用效率

冬小麦的田间水分利用效率用下式计算

$$WUE=Y/ETa$$

式中, WUE 为水分利用效率, kg/m^3 ; Y 为籽粒产量, kg/hm^2 ; ETa 为小麦全生育期间耗水量, m^3/hm^2 。

1.4 数据分析

试验数据用 EXCEL2007 进行处理, 利用 DPS12.50 统计分析软件进行试验结果的方差分析及显著性检验 (Duncan 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 不同年代冬小麦品种的耗水特性

2.1.1 不同冬小麦品种总耗水量及对土壤贮水消耗量的差异

由图 1 和图 2 可以看出, 不同水分处理下冬小麦品种的总耗水量和土壤贮水消耗量存在一定的差异, 但并没有表现出随品种更替而规律性变化的趋势来。

在 W_0 、 W_1 和 W_2 处理下, 第一个生长季里品种耗水的变异系数为 5.5%、4.5%和 8.2%, 第二个生长季则为 2.9%、2.2%和 2.4%。两个生长季中各品种的总耗水量变化趋势相同, 即随着灌水次数的增加, 各品种的总耗水量相应增加, 表现为 $W_2 > W_1 > W_0$ 。随着灌水的增加, 土壤贮水消耗量降低, 第一个生长季土壤水消耗分别占到总耗水量 42.1%、36.4%和 28.7%, 第二生长季为 34.4%、30.0%和 26.8%。

由图 1a 可以看出, 2010—2011 生长季, W_0 和 W_1 下冬小麦品种耗水量差异不显著 ($P > 0.05$), 20 世纪 70、90 年代和 2002 年品种耗水量和土壤贮水消耗相对高于其它品种。 W_2 下 20 世纪 50 和 70 年代品种耗水量和土壤贮水消耗与高于 80-90 年代品种, 且差异显著 ($P < 0.05$)。2011-2012 生长季 W_0 下 20 世纪 90 年代和 2002 年品种耗水和土壤贮水消耗显著高于 2007 年品种 (图 1b); W_1 处理 20 世纪 80 和 90 年代品种耗水和土壤贮水消耗与 50 年代品种差异显著 ($P < 0.05$); W_2 处理 20 世纪 60 和 90 年代品种耗水量和土壤贮水消耗量相对高于其它品种。研究表明, 随着灌水次数的增加, 小麦的耗水量呈增加趋势, 总耗水受降雨和灌水影响较大, 在拔节和灌浆期灌水小麦耗水与品种和年代差异关系不大。

2.1.2 不同冬小麦品种阶段耗水量、耗水模系数和日耗水量的差异

为了确定冬小麦品种和水分的互作效应, 利用

DPS12.50 统计软件对不同水分处理下冬小麦品种阶段耗水量、日耗水强度和耗水模系数进行方差分析, 结果见表 3, 阶段耗水量、日耗水强度和耗水模系数存在显著或极显著差异, 品种间与水分处理

间存在真实且显著的交互效应, 因此, 可进一步进行各处理间各指标稳定性分析。两个生长季变化趋势一致, 阶段耗水量等指标主要以 2011-2012 年生长季试验结果进行分析。

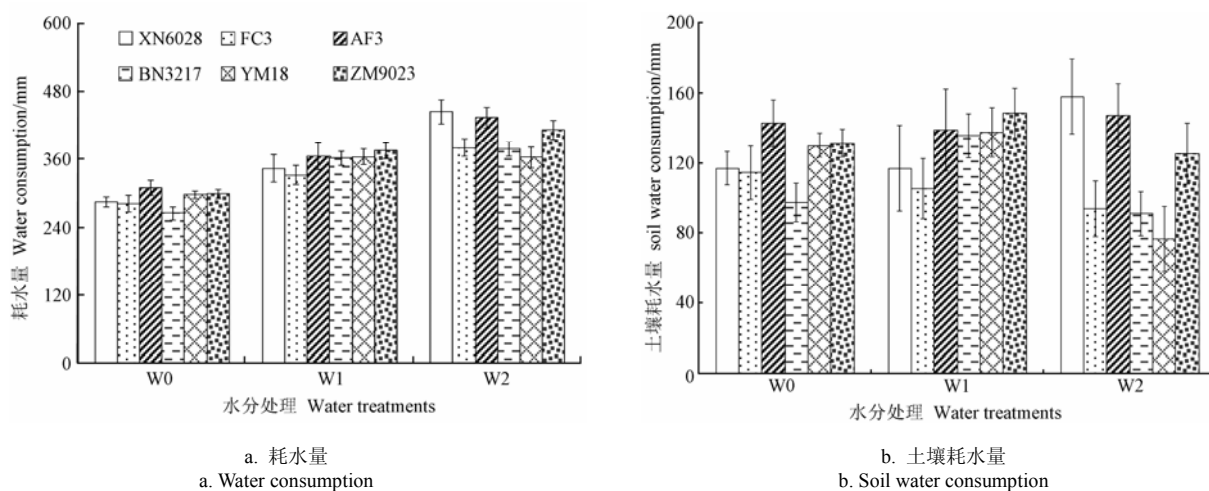


图 1 不同水分处理下冬小麦品种耗水量的差异 (2010-2011 年)

Fig.1 Difference of water consumption of winter wheat cultivars under different water treatments (2010-2011)

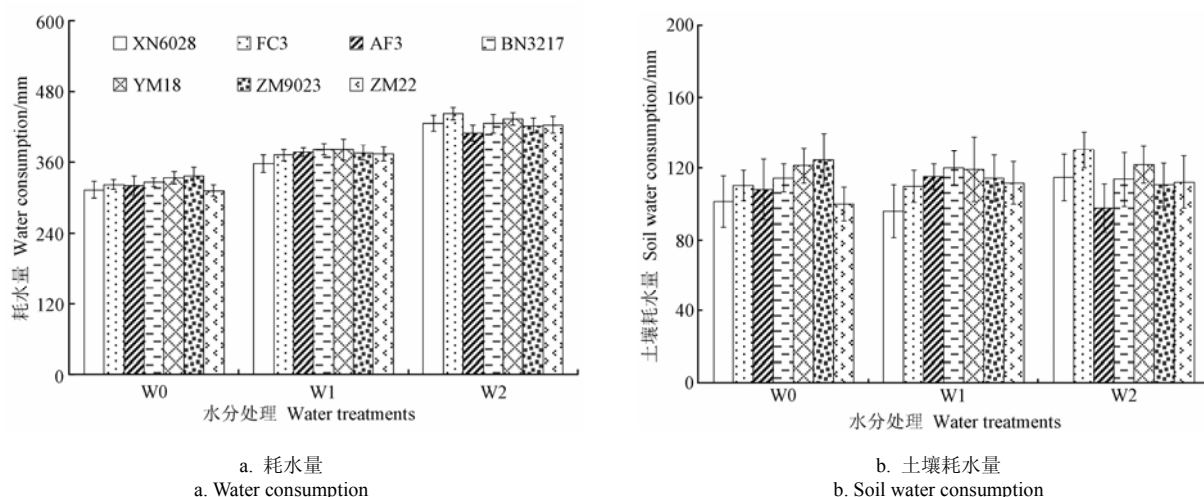


图 2 不同水分处理下冬小麦品种耗水量的差异 (2011-2012 年)

Fig.2 Difference of water consumption of winter wheat cultivars under different water treatments (2011-2012)

不同冬小麦品种的阶段耗水量和日耗水强度变化趋势相同, 从拔节至开花期, 20 世纪 50、70 年代和 2007 年品种阶段耗水和日耗水强度表现为 $W1, W2 > W0$, 80、90 年代和 2002 年品种表现为 $W1 > W0 > W2$, 耗水模系数总体表现为 $W0 > W1, W2$; $W0$ 下 20 世纪 60 年代和 2002 年阶段耗水量和日耗水强度显著高于 50、80 年代和 2007 年品种, 20 世纪 60、70 年代和 2002 年的品种耗水模系数与其它年代品种差异显著 ($P < 0.05$); $W1$ 下 20 世纪 70、90 年代和 2002 年品种的耗水量和耗水模系数比 50、60 和 80 年代品种高 8.7%~22.1%和 8.7%~15.1%, 且差异显著; $W2$ 处理的 50~70 年代和 2007 年品种耗水量、日耗水强度和耗水模系

数比其他年代品种高 17.8%~36.2%和 18.7%~35.8%。

在开花至成熟期, 冬小麦品种阶段耗水、日耗水强度和耗水模系数为 $W2 > W1 > W0$ 。 $W0$ 下的 90 年代和 2002 年品种阶段耗水量和耗水模系数比其它年代品种高 15.6%~26.6%和 9.9%~19.8%; $W1$ 下冬小麦品种耗水、日耗水强度和耗水模系数差异不显著; $W2$ 下 90 年代品种耗水量、日耗水强度和耗水模系数相对最高。表明由于降雨量和灌水引起土壤水分变化导致冬小麦品种阶段耗水和耗水模系数变化规律有差异。灌水可以明显提高冬小麦品种阶段耗水量和耗水模系数。在拔节期和灌浆期干旱胁迫下, 90 年代及以前的

品种在不同生育期表现出耗水多的趋势,可能跟其地上部生长优势有关,90 年代及以后的冬小麦品种在拔节至成熟期阶段耗水、耗水模系数和日

耗水强度较高,表明现代品种的对灌溉水利用较高,阶段耗水量较高的特征可能是其水分利用率较高的生理基础。

表 3 冬小麦品种的各生育阶段的耗水量、耗水模系数和日耗水量的方差分析(2011—2012 年)

Table 3 Variance analysis of parameters of Water consumption amount (CA), water consumption percentage (CP) and water consumption per day (CD) of winter wheat cultivars with different water treatments (2011—2012)

指标 Index	变异来源 Source of variation	F 值 F value				
		播种-越冬 Seeding to overwintering	越冬-返青 Over-wintering to revival	返青-拔节 Revival to jointing	拔节-开花 Jointing to flowering	开花-成熟 Flowering to maturity
CA Water consumption amount/mm	区组间 B	0.56	1.09	0.51	0.13	0.76
	品种 C	33.61**	0.57	2.72*	8.79**	16.64**
	水分 W	42.26**	6.95**	23.94**	32.98**	698.26**
	水分×品种 W×C	12.00**	5.34**	2.18*	14.88**	4.67**
CP Water consumption percentage/%	区组间 B	3.02	0.63	0.19	0.51	0.08
	品种 C	3.06*	1.33	3.40**	11.96**	15.36**
	水分 W	31.55**	20.93**	2.48	119.27**	332.00**
	水分×品种 W×C	7.73**	5.48**	2.49*	14.78**	5.35**
CD Water consumption per day/mm	区组间 B	0.56	1.09	0.51	0.13	0.76
	品种 C	33.61**	0.57	2.72*	8.79**	16.64**
	水分 W	42.26**	6.95**	23.94**	32.98**	698.26**
	水分×品种 W×C	12.00**	5.34**	2.18*	14.88**	4.67**

注:* 表示达到 5%显著水平; **表示达到 1%的极显著水平。

Note:* indicate significant different ($p<0.05$); ** indicate significant different ($p<0.01$), B-Block, C-Cultivars. W-water treatments, W×C-Cultivars ×water treatments.

2.3 不同年代冬小麦品种产量及构成因素的差异

冬小麦籽粒产量的 3 个构成因素是单位面积穗数、每穗粒数和千粒重,表 4 是冬小麦品种在不同水分下产量各因素的比较,冬小麦品种的单位面积穗数

和穗粒数没有表现出年代增加表现出更替规律来,但早期品种略高于现代品种,千粒重表现为增加趋势。品种和水分互作对穗粒数和千粒重影响极显著(F 穗粒数=3.23, 6.34; F 千粒重=3.55, 46.6; $P<0.01$)。

表 4 2010—2012 年生长季不同年代冬小麦品种的产量构成因素

Table 4 Yield component of winter wheat cultivars in different eras under different treatments in 2010—2012

指标 Index	生长季 Growing season	处理 Treatment	西农 6028 XN6028	丰产 3 号 FC3	矮丰 3 号 AF3	百农 3217 BN3217	豫麦 18 YM18	郑麦 9023 ZM9023	周麦 22 ZM22
穗数 Spikes square meter/m ²	2010—2011	W0	291 ^{a,BC}	498 ^{a,A}	422 ^{a,A}	395 ^{a,AB}	207 ^{b,C}	384 ^{b,AB}	
		W1	323 ^{a,C}	516 ^{a,A}	448 ^{a,AB}	389 ^{a,BC}	360 ^{a,BC}	513 ^{a,A}	
		W2	383 ^{a,A}	500 ^{a,A}	379 ^{a,A}	448 ^{a,A}	421 ^{a,A}	463 ^{a,AB}	
	2011—2012	W0	376 ^{ab,ABC}	401 ^{b,AB}	451 ^{b,A}	299 ^{b,C}	321 ^{b,BC}	470 ^{a,A}	380 ^{a,ABC}
		W1	313 ^{b,D}	554 ^{a,A}	445 ^{b,BC}	361 ^{b,CD}	455 ^{a,B}	408 ^{a,BC}	375 ^{a,BCD}
		W2	448 ^{a,C}	521 ^{a,ABC}	576 ^{a,AB}	593 ^{a,A}	455 ^{a,C}	496 ^{a,BC}	453 ^{a,C}
穗粒数 Seed number per spike	2010—2011	W0	42 ^{a,A}	25 ^{a,B}	31 ^{a,B}	29 ^{a,B}	37 ^{a,A}	30 ^{a,B}	
		W1	44 ^{a,A}	28 ^{a,D}	37 ^{a,BC}	31 ^{a,CD}	38 ^{a,B}	29 ^{a,D}	
		W2	41 ^{a,B}	31 ^{a,D}	49 ^{a,A}	34 ^{a,CD}	38 ^{a,BC}	32 ^{a,D}	
	2011—2012	W0	43 ^{c,A}	34 ^{a,B}	34 ^{b,B}	41 ^{a,AB}	40 ^{a,AB}	27 ^{b,C}	37 ^{b,AB}
		W1	58 ^{a,A}	27 ^{b,D}	42 ^{a,B}	43 ^{a,B}	34 ^{b,C}	34 ^{a,C}	44 ^{a,B}
		W2	50 ^{b,A}	31 ^{ab,C}	31 ^{b,C}	28 ^{b,C}	41 ^{a,B}	35 ^{a,C}	41 ^{ab,C}
千粒重 Thousand kernel weight/g	2010—2011	W0	28.97 ^{b,E}	36.80 ^{b,C}	33.42 ^{a,D}	38.52 ^{a,C}	43.12 ^{ab,B}	48.08 ^{ab,A}	
		W1	27.43 ^{b,E}	38.07 ^{ab,C}	32.18 ^{a,D}	36.70 ^{ab,C}	41.87 ^{b,B}	46.26 ^{b,A}	
		W2	31.20 ^{a,E}	39.87 ^{c,C}	31.54 ^{a,E}	35.91 ^{b,D}	44.09 ^{a,B}	48.49 ^{a,A}	
	2011—2012	W0	28.40 ^{a,G}	39.82 ^{c,D}	32.78 ^{b,F}	39.08 ^{a,E}	43.96 ^{a,C}	47.30 ^{b,A}	44.94 ^{b,B}
		W1	27.20 ^{b,G}	40.49 ^{b,D}	32.26 ^{c,F}	34.72 ^{c,E}	43.87 ^{a,C}	49.14 ^{a,A}	44.45 ^{b,B}
		W2	28.30 ^{a,G}	42.28 ^{a,D}	35.50 ^{a,F}	36.80 ^{b,E}	43.60 ^{a,C}	46.72 ^{c,A}	45.65 ^{a,B}

注: W0 为不灌水; W1 为拔节期灌水; W2 为拔节和灌浆期灌水; 小写字母表示同一品种不同水分下差异达 5%显著水平; 大写字母表示不同品种在同一水分处理下差异达 5%显著水平。下同。

Note: W0 is no irrigation; W1 is irrigation at jointing stage; W2 is irrigation at jointing and milky stage. Different normal letters indicate significant different of water treatment in same wheat ($p<0.05$); Different capital letters indicate significant different of wheat cultivars under same water treatment ($p<0.05$). The same below.

两年生长季在 W0、W1 和 W2 处理下,冬小麦品种千粒重差异显著,20 世纪 90 年代及以后品种千粒重比 80 年代及以前品种高 10.4%~66.6%、

8.3%~80.7%和 3.1%~65.1%。冬小麦品种的单位面积穗数、穗粒数和千粒重对不同水分处理响应有差异,在 W0 处理下产量构成因素波动相对较大。

70 年代及以前的冬小麦品种在每平方米穗数和穗粒数相对较高可能是相同的播种量, 早期品种的亩穗数高于现代品种, 导致分蘖较高所致。90 年代及以后的品种千粒重明显高于早期品种, 是产量增加的重要因素。灌水会在一定范围内增加冬小麦分蘖, 拔节期水分亏缺减少了有效穗数, 但规律不明显。两年生长季冬小麦品种穗粒数有不同程度变化, 除去栽培环境的一致性外, 穗粒数差异主要是由水分条件决定。60 年代和 80 年代千粒重在拔节期和灌浆期胁迫下较高, 表明一定程度的水分亏缺可以促进干物质向籽粒转移增加千粒重。

2.4 不同年代冬小麦品种籽粒产量和收获指数的差异

由表 5 可以看出, 随冬小麦品种更替, 籽粒产量总体呈增加趋势, 冬小麦品种籽粒产量等对不同水分响应不同。随着灌水次数的增加, 冬小麦品种产量表现为 $W2 > W1 > W0$, 品种和水分互作对籽粒产量影响显著 ($F_{yield}=2.34$, $P<0.05$)。从 $W0$ 到

$W2$ 处理, 冬小麦品种平均籽粒产量在第一年生长季增加 26.3% 和 15.4%, 在第二年生长季增加 14.8% 和 16.1%。两个生长季冬小麦籽粒产量的变异系数在 $W0$ 下最大, 分别为 14.0% 和 6.9%。2010—2011 生长季, 冬小麦产量由 50 年代的 $4\ 069\text{ kg/hm}^2$ 增加到 2002 年的 $6\ 443\text{ kg/hm}^2$, 平均增加 58.4%, 平均每次更替增加 396 kg/hm^2 。2011—2012 生长季, 冬小麦产量由 50 年代的 $5\ 206\text{ kg/hm}^2$ 增加到 2007 年的 $7\ 381\text{ kg/hm}^2$, 平均增加 41.8%, 平均每次更替增加 362 kg/hm^2 。在 $W0$ 、 $W1$ 和 $W2$ 第二生长季 90 年代及以后品种平均籽粒产量分别比 50-80 年代增加 13.6%~33.6%、14.9%~42.7% 和 21.8%~35.0%。品种更替的结果使得产量稳步提高, 冬小麦品种平均产量在不同水分处理下差异显著, 拔节和灌浆关键生育期灌水能促进小麦灌浆速度和延长了灌浆时间, 表明小麦产量在给予合理的灌溉制度上仍有增加的潜力, 为最终籽粒产量的增加奠定基础。

表 5 2010—2012 生长季不同年代冬小麦品种的 WUE
Table 5 WUE of winter wheat cultivars in different eras under different treatments in 2010—2012

指标 Index	生长季 Growing season	处理 Treatment	西农 6028 XN6028	丰产 3 号 FC3	矮丰 3 号 AF3	百农 3217 BN3217	豫麦 18 YM18	郑麦 9023 ZM9023	周麦 22 ZM22
籽粒产量 Grain yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	2010—2011	W0	3511 ^{b,BC}	4484 ^{b,AB}	4368 ^{b,AB}	4448 ^{a,AB}	3228 ^{c,C}	5374 ^{b,A}	
		W1	3856 ^{ab,D}	5448 ^{ab,BC}	5262 ^{ab,BC}	4478 ^{a,CD}	5737 ^{b,B}	6863 ^{a,A}	
		W2	4839 ^{a,C}	6006 ^{a,AB}	5805 ^{a,BC}	5417 ^{a,BC}	6983 ^{a,A}	7092 ^{a,A}	
	2011—2012	W0	4466 ^{b,E}	5255 ^{c,BCD}	5068 ^{b,CDE}	4719 ^{b,DE}	5640 ^{c,BC}	5896 ^{c,AB}	6369 ^{c,A}
		W1	4860 ^{b,C}	6034 ^{b,B}	6002 ^{a,B}	5310 ^{b,C}	6708 ^{b,A}	6787 ^{b,A}	7306 ^{b,A}
		W2	6293 ^{a,B}	6710 ^{a,B}	6247 ^{a,B}	6053 ^{a,B}	8091 ^{a,A}	7957 ^{a,A}	8468 ^{a,A}
收获指数 HI	2010—2011	W0	0.27 ^{ab,B}	0.25 ^{a,B}	0.22 ^{a,B}	0.36 ^{a,A}	0.29 ^{a,AB}	0.35 ^{a,A}	
		W1	0.21 ^{b,B}	0.26 ^{a,B}	0.26 ^{a,B}	0.35 ^{a,A}	0.33 ^{ab,A}	0.37 ^{a,A}	
		W2	0.33 ^{a,AB}	0.30 ^{a,B}	0.26 ^{a,B}	0.37 ^{a,A}	0.39 ^{a,A}	0.38 ^{a,A}	
	2011—2012	W0	0.34 ^{a,ABC}	0.31 ^{a,C}	0.33 ^{a,BC}	0.34 ^{a,ABC}	0.35 ^{a,AB}	0.33 ^{b,BC}	0.37 ^{a,A}
		W1	0.30 ^{b,BC}	0.30 ^{a,BC}	0.34 ^{a,AB}	0.31 ^{a,BC}	0.34 ^{a,AB}	0.35 ^{ab,A}	0.36 ^{a,A}
		W2	0.31 ^{ab,D}	0.33 ^{a,BCD}	0.36 ^{a,ABC}	0.33 ^{a,BCD}	0.36 ^{a,ABC}	0.37 ^{a,AB}	0.39 ^{a,A}
水分利用效率 WUE ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2010—2011	W0	1.24 ^{a,C}	1.59 ^{a,AB}	1.41 ^{a,BC}	1.68 ^{a,AB}	1.09 ^{c,C}	1.80 ^{a,A}	
		W1	1.12 ^{a,C}	1.64 ^{a,AB}	1.44 ^{a,BC}	1.23 ^{b,C}	1.57 ^{b,AB}	1.82 ^{a,A}	
		W2	1.09 ^{a,D}	1.58 ^{a,BC}	1.34 ^{a,CD}	1.43 ^{ab,BC}	1.92 ^{a,A}	1.72 ^{a,AB}	
	2011—2012	W0	1.42 ^{a,C}	1.63 ^{a,B}	1.58 ^{a,BC}	1.44 ^{a,C}	1.69 ^{a,B}	1.75 ^{a,B}	2.04 ^{a,A}
		W1	1.35 ^{a,D}	1.62 ^{a,BC}	1.59 ^{a,C}	1.39 ^{a,D}	1.76 ^{a,BC}	1.80 ^{a,AB}	1.95 ^{a,A}
		W2	1.47 ^{a,B}	1.51 ^{a,B}	1.52 ^{a,B}	1.42 ^{a,B}	1.86 ^{a,A}	1.88 ^{a,A}	1.99 ^{a,A}

随着品种更替, 冬小麦的收获指数 (harvest index) 总体呈增加趋势, 不同年代品种收获指数存在差异。第一生长季, HI 由 50 年代的 0.27 增加到 0.37, 平均增加 37.0%, 每次更替增加 0.02。在 $W0$ 、 $W1$ 和 $W2$ 处理下, 2002 年品种的 HI 分别为 0.35、0.37 和 0.38, 比 50 年代品种增加 21.0%、70.7% 和 15.4%, 比 60—70 年代品种增加 50.0%、45.9% 和 36.8%。第二生长季, HI 由 50 年代的 0.32 增加到 2007 年的 0.37, 平均增加 18.0%, 每次更替增加 0.01。在 $W0$ 、 $W1$ 和 $W2$ 处理下, 2007 年品种的

HI 为 0.37、0.36 和 0.39, 比 50 年代品种增加 9.4%、20.0% 和 25.7%。比 60—90 年代品种也有不同程度的增加。结果表明冬小麦品种 HI 随着年代增加稳定增加, 90 年代及以后品种在充分灌水条件下 HI 增加幅度要高于早期品种, 水分胁迫通过影响干物质积累和转运降低影响籽粒灌浆, 使得籽粒产量降低高于生物量降低, 因此引起 HI 降低。

2.5 不同年代冬小麦品种水分利用效率的差异

随着灌水次数的增加, 冬小麦品种的 WUE 呈降低趋势 (表 5), 第一年生长季除 90 年代品种外,

其余品种 WUE 表现为 $W_0 > W_2$, 第二年生长季 60—80 年代和 2009 年品种 WUE 表现为 $W_0 > W_2$, 表明一定程度干旱胁迫引起 WUE 增加, 在拔节期和灌浆期灌水反而会降低 WUE。在品种更替过程中, 冬小麦品种 WUE 总体呈增加趋势, 品种对 WUE 影响显著 ($P < 0.05$)。第一年生长季, 由 50 年代的 1.15 kg/m^3 增加到 2002 年的 1.78 kg/m^3 , 平均递增 55.3%, 每次更替增加 0.11 kg/m^3 。在 W_0 、 W_1 和 W_2 处理下, 2002 年品种 WUE 为 1.8、1.83 和 1.72 kg/m^3 , 比 50 年代品种增加 45.6%、63.2% 和 58.1%, 70—80 年代品种 WUE 比 60 年代前品种有不同程度降低。第二生长季, 由 50 年代的 1.42 kg/m^3 增加到 2007 年的 2.0, 平均递增 40.8%, 每次更替增加 0.10 kg/m^3 。在 3 种水分处理下, 2007 年品种的 WUE 分别为 2.04、1.95 和 1.99 kg/m^3 , 比 50 年代前品种增加 43.4%、44.0% 和 35.4%。结果表明在品种更替过程中, 伴随着籽粒产量的增加, WUE 也呈稳定增加趋势, 现代品种改良方向是向着高产和节水方向进行, 但因品种、灌水量和灌水时期的不同而有明显差异。

3 讨 论

山仑^[25]年提出提高降雨和灌溉的利用率是解决节水农业的关键问题, 灌溉水不足的地方, 小麦水分调控的重点是提高土壤贮水利用率。如何协调统一三者比例问题一直是节水农业研究的重点。产量 WUE 由籽粒产量和耗水量决定的, 品种间的遗传差异和生态环境因素及一切可以影响籽粒产量和耗水量的因素都会直接或者间接影响到产量 WUE。冬小麦品种全生育期生理耗水的差异主要由各生育期阶段耗水差异累积所致。在本研究中两年生长季冬小麦总耗水趋势相同, 即随着灌水的增加, 耗水量增加, 主要表现为灌水量占总耗水量的比例升高, 土壤贮水消耗量所占耗水比例降低, 冬小麦对灌溉水利用增加, 这点与褚鹏飞^[6]和王淑芬^[26]研究结果相同。产量 WUE 在返青后不灌水和灌拔节水的条件下最高, 主要是水分胁迫增加了小麦根系对土壤贮水的利用, 这点与 Sun^[27]和 Zhang^[28]结论相同。

在品种更替过程中, 小麦总耗水量并没有表现出更替趋势, 而且受降雨和灌溉影响较大, 有时可能超过遗传生理与蒸腾耗水差异^[3]。早期品种的选育是建立在过去土壤肥力和灌溉条件都较差的基础上, 而在当前栽培条件下根系生物量大, 深层根系吸水能力较强使得早期品种在不同生育阶段表现出耗水较高的趋势; 90 年代及以后品种总耗水表现出较高的趋势, 主要是由于阶段耗水量和日耗水

强度较高累积所致, 说明 90 年代及以后品种更加适应良好的水肥条件以保持高产。两年生长季冬小麦耗水产生差异的原因主要由降雨量, 第一年生长季降雨量仅为 97.1 mm, 属于枯水年, 早期品种表现出耗水较高的趋势; 第二年生长季降雨量为 172.3 mm, 属于丰水年, 降雨量的差异对冬小麦的耗水差异影响较大。

在 3 种灌水处理下, 两年生长季里 90 年代及以后品种平均籽粒产量比早期品种增加 53.0%、48.8% 和 44.3%, 收获指数增加 20.9%、20.0% 和 25.7%, 籽粒产量的增加主要是因为千粒重和收获指数的增加^[29]。冬小麦品种的产量存在遗传差异, 使得现代品种不同水分处理下能维持较高的水分利用效率。冬小麦产量 WUE 自 70 年代后稳定增加, 虽然 90 年代和 2002 年品种耗水量在干旱胁迫下高于早期品种, 但产量降低的幅度低于早期品种, 产量 WUE 仍然高于早期品种。品种更替过程中, 在耗水量较为稳定的条件下, 产量水平的提高是 WUE 增加的主导因素^[30]。在拔节期和灌浆期水分胁迫下, 小麦耗水量降低幅度大, 而产量的降幅较小, 有利于水分利用效率的提高, 但最终降低了冬小麦籽粒产量。WUE 年代间差异随着灌水的增加而递减, 可以推测现代品种的抗旱能力在逐步加强。

在本试验中, 冬小麦品种总耗水量和籽粒产量在灌拔节水和灌浆水条件下最高, 表明不同品种达到最优的产量和 WUE 需要的灌水量和灌水次数不同。而在本试验内并不能确定这个耗水量范围和 WUE 的最大值, 这个阈值的确定仍然需要大量的实践研究来确定。通过改变灌水量可有效调节小麦对土壤贮水的吸收利用。在不同生育期灌水次数与灌水量对小麦产量形成的影响有所不同^[5], 今后小麦栽培在拔节期控水减少生育前期耗水比例, 提高生育后期耗水比例, 有利于籽粒灌浆与充实, 有利于小麦产量增加, 达到高产节水的目的。不足之处是将不同年代冬小麦品种放在当前水肥条件下进行试验, 并不能代表不同年代当时的实际生产水平, 但仍能反映出品种更替过程中的基本规律。

4 结 论

1) 在品种更替过程中, 小麦总耗水量并没有表现出明显更替趋势, 受品种、降雨和灌溉影响较大。冬小麦品种全生育期生理耗水的差异主要由各生育期阶段耗水差异累积所致。早期品种在不同生育阶段耗水较高跟其选育栽培条件有关; 90 年代及以后品种更加适应现代良好的水肥条件以保持高产。

2) 冬小麦品种的平均穗数、穗粒数和千粒重对不同水分处理响应有差异, 冬小麦千粒重随年代

增加而增加, 而单位面积穗数和穗粒数无明显增加规律。在品种更替过程中, 冬小麦籽粒产量的增加主要是因为收获指数和千粒重的增加。拔节和灌浆关键生育期灌水能促进小麦灌浆速度和延长了灌浆时间, 为最终籽粒产量的增加奠定基础。

3) 在品种更替过程中, 冬小麦品种 WUE 总体呈增加趋势, 现代品种改良方向是向着高产和节水方向进行, 但因品种、灌水量和灌水时期的不同而有明显差异。一定程度干旱胁迫引起 WUE 增加, 在拔节期和灌浆期灌水反而会降低 WUE。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Y Q, Eloise K, Yu Q, et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 64: 107—122.
- [2] 康绍忠, 胡笑涛, 蔡焕杰, 等. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J]. *水利学报*, 2004, 12(12): 1—7.
Kang shaozhong, Hu xiaotao, Cai huanjie, et al. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 12(12): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [3] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 27—33.
Dong Baodi, Zhang Zhengbin, Liu Mengyu, et al. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(9): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [4] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 20—23.
Xiao Junfu, Liu Zhandong, Duan Aiwang, et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(2): 20—23. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1965—1970.
Wang Demei, Yu Zhenwen. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. *Chin.J. Appl Eco.l*, 2008, 19(9): 1965—1970. (in Chinese with English abstract)
- [6] 褚鹏飞, 王东, 张永丽. 灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(4): 1306—1315.
Chu Pengfei, Wang Dong, Zang Yongli, et al. Effects of irrigation stage and amount on water consumption characteristics, grain yield and content of protein components of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4): 1306—1315. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王红光, 于振文, 张永丽. 推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 183—1191.
Wang Hongguang, Yu Zhenwen. Effects of delayed irrigation at jointing stage and irrigation level on consumption amount and resources of water in wheat and farmland evapotranspiration[J]. *Acta agronomica sinica*2010, 36(7): 183—1191. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曹广才. 华北小麦[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [9] 张智猛, 戴良香, 董立峰, 等. 北方冬麦区品种农艺性状更替及源库问题的探讨[J]. *河北农业技术师范学院学报*, 1997, 11(3): 1—3.
Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, Dong Lifeng, et al. Discussion on the succession and the source of winter wheats agronomical characters in north China[J]. *Journal of Hebei Agrotechnical Teachers College*, 1997, 11(3): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李雁鸣, 刘莹, 张立言. 华北地区小麦品种更替过程中光合器官细胞形态和光合性能演替规律的研究: II. 旗叶光合性能的演替[J]. *河北农业大学学报*, 1998, 21(4): 7—11.
Li Yanming, Liu Ying, Zhang Liyan. Studies on the changes of leaf cell morphology and photosynthetic performances during evolutional succession of winter wheat cultivars in north China II. changes in photosynthetic performances of flag leaves[J]. *Journal of agricultural university of HeBei*, 1998, 21(4): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [11] 康建宏. 宁夏平原春小麦品种更替中光合特性的演替规律研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2004.
Kang Jianhong. Studies on Photosynthetic Property During Evolutional Succession of Spring Wheat Varieties in Irrigation District of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia university, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [12] 毕建杰. 山东小麦品种更替过程中品种的光合特性及农艺性状更替趋势研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
Bi Jianjie. Studies on the Changes of Photosynthetic Performance and Agronomic Characters During Evolutional Succession of Winter Wheat Cultivar in

- Shandong Province[D]. Taian: Shandong agriculture university, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王士红, 荆奇, 戴廷波, 等. 不同年代冬小麦品种旗叶光合特性和产量的演变特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1255—1260.
- Wang Shihong, Jin Qi, Dai Tingbo, et al. Evolution characteristics of flag leaf photosynthesis and grain yield of wheat cultivars bred in different years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1255—1260. (in Chinese with English abstract)
- [14] McCaig T N, Depauw R M. Breeding hard red spring wheat in western Canada: historical trends in yield and related variables[J]. Canadian Journal of Plant science, 1995, 75: 387—393.
- [15] McCaig T N, Clarke J M. Breeding durum wheat in western Canada: historical trends in yield and related variables[J]. Canadian Journal of Plant science, 1995, 75: 55—60.
- [16] 王振华, 张喜英, 陈素英, 等. 不同年代冬小麦品种产量性状和生理生态指标差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 75—79.
- Wang Zhenhua, Zhang Xiying, Chen Suying, et al. Analysis of yield components, physiological and agronomic characters of different cultivars of winter wheat bred during different ages[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [17] 许为钢, 胡琳, 吴兆苏, 等. 关中地区小麦品种产量与产量构成遗传改良的研究[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 352—358.
- Xu Weigang, Hu lin, Wu Zhaosu, et al. Studies on genetic improvement of yield and yield components of wheat cultivars in mid-Shanxi area[J]. Acta agronomica sinica, 2000, 26(3): 352—358. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘合芹. 不同年代推出的冬小麦(*Triticum aestivum*L.) 农艺性状以及光合生理生态特性[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- Liu Heqin. Agricultural Properties and Photosynthetic Characteristics of Winter Wheat Cultivars Released in Different Years[D]. Beijing: Graduate school, the Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [19] 许晶晶. 陕西小麦品种更替过程中光合特性演变及其抗旱性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- Xu Jingjing. Study on Photosynthesis Characteristics and Drought Tolerance of Wheat Cultivar in Shanxi[D]. Yangling: Northwest A and F university, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [20] 景蕊莲, 吕小平, 吴志明. 不同年代冬小麦抗旱品种苗期性状演变. 作物品种资源, 1996, 3: 5—7.
- [21] 李鲁华. 水分胁迫对不同年代品种春小麦生长特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- Li luhua. Effects of Water Stress on Growing Characters of Different Varieties C.V. Spring Wheat[D]. Yangling: Northwest A & F university, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [22] McCaig T N, Depauw R M. Breeding hard red spring wheat in western Canada: Historical trends in yield and related variables[J]. Canadian Journal of Plant science, 1995, 75: 387—393.
- [23] 王绍中, 郑天存, 郭天财. 河南小麦育种栽培研究进展[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 曹廷杰. 河南省近二十年来小麦育成品种主要农艺性状遗传演变规律[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- Cao Ting jie, Evolution of Main Agronomic Traits for Wheat Improved Varieties in Henan Province in the Past Twenty Years[D]. Zheng zhou: Henan agriculture university, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [25] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70—76.
- Shan Lun, Xu Meng. Water saving agriculture and its physio-ecological bases[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1991, 2(1): 70—76. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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.
- Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [27] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85: 211—218.
- [28] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain, Agric Water Manage, 2010, 97(8): 1117—1125.
- [29] 周阳, 何中虎, 陈新民, 等. 30 余年来北部冬麦区小麦品种产量改良遗传进展[J]. 作物学报, 2007, 33(9): 1530—1535.
- Zhou Yang, He Zhonghu, Chen Xinmin, et al. Genetic gain of wheat breeding for yield in northern winter wheat

- zone over 30 years[J]. *Acta agronomica sinica*, 2007, 33(9):1530—1535. (in Chinese with English abstract)
- [30] 邱新强, 黄玲, 高阳, 等. 不同年代冬小麦品种水分利用效率差异分析[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(2): 25—29.

Qiu Xinqiang, Huang ling, Gao yang, et al, Analysis of difference in water use efficiency of winter wheat cultivars released in different eras[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(2): 25—29. (in Chinese with English abstract)

Effects of irrigation amount and stage on yield and water consumption of different winter wheat cultivars

Huang Ling¹, Gao Yang¹, Qiu Xinqiang², Li Xinqiang¹, Shen Xiaojun¹, Sun Jingsheng¹, Gong Wenjun³, Duan Aiwang^{1*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Lab for Crop Water Requirement and its Regulation of Ministry of Agriculture, Xinxiang 453003, China; 2. Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou 450003, China; 3. Jiaozuo Guangli Irrigation District, Qinyang 454550, China)

Abstract: Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) is the main cereal crop grown in the arid and semi-arid regions of the world. Average yields of winter wheat in many countries have increased by 40% over the past five decades due to the development of new cultivars, improvements of crop management practices and changes of favorable climate. However, water shortage is becoming an important factor limiting sustainable winter wheat production in many parts of the world. The greatest challenge for the winter wheat producers is to produce more wheat grain from limited water, and an available way to face the challenge is to improve winter wheat water productivity. Winter wheat water productivity had been significantly improved in the last 25 years, but there is still a big room for improving further. Selecting cultivars with more efficient water use is a key means to reduce water consumption in winter wheat production in the water-scarce regions. A field experiment was carried out during 2010 to 2011 and 2011 to 2012 growing seasons of winter wheat to clarify the variations in water consumption, grain yield, and water use efficiency (WUE), and their responses to water stress during the process of cultivar replacement in past decades. Seven cultivars of winter wheat released from 1950s to the current, in which each cultivar was once widely planted in north central Henan province during a certain decade, were taken as experimental materials. At the mean time, three irrigation regimes were designed including no irrigation after turning green (W0), irrigation applied only once at jointing (W1), and irrigation applied at jointing, and at filling, respectively (W2), to investigate dynamics of water consumption characteristics, yield components, harvest index, and WUE of winter wheat. Results showed that precipitation and timing of irrigation significantly impacted total water consumption and soil water extraction of winter wheat while different planting decades had insignificant effect on them. 1000-kernel weight during 1990s to the current kept more than 41 g, significantly higher than that during the earlier planting decades. During the 2010 to 2011 and 2011 to 2012 growing seasons, grain yields of winter wheat were increased by 396 and 362 kg/hm², or 58.4 % and 41.8 % higher than the average yield across 1950s to the present, respectively; similarly, harvest indices were increased by 37.0 % and 18.0 %, an increase of 0.2 and 0.1 from the previous average indices; WUE was increased by 55.3 % and 40.8 %, an increase of 0.11 and 0.10 kg/m³, respectively. Improvement of grain yield is mainly attributable to the improved source to sink relationship, boosted 1000-kernel weight, and increased harvest index. Grain yield and WUE are significantly influenced by cultivar × soil water interaction, and can be significantly improved by supplemental irrigation applied at jointing and at filling stages of winter wheat.

Key words: irrigation, soils, moisture, winter wheat, agronomic trait, water consumption characteristic, grain yield, water use efficiency

(责任编辑: 曾懿婷)