

高产条件下不同小麦品种耗水特性和水分利用效率的差异

王德梅¹, 于振文^{1,*}, 许振柱²

(1. 山东农业大学农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 山东泰安 271018;

2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 设置不灌水(W0)、底墒水+拔节水(W1)、底墒水+拔节水+开花水(W2)3个灌水处理, 采用6个冬小麦(*Triticum aestivum*, L.)品种, 研究了不同品种耗水特性和水分利用效率的差异。结果表明: (1) 依据籽粒产量和水分利用效率2个因子, 采用聚类分析的方法, 将供试品种分为高水分利用效率组(I组)、中水分利用效率组(II组)和低水分利用效率组(III组)。同一灌水条件下的籽粒产量, I组显著高于II组和III组; II组和III组在W0条件下无显著差异, 在W1和W2条件下II组显著高于III组。(2) 从I组、II组、III组中分别取1个品种, 泰山23、潍麦8号、山农12进一步分析表明, 在W0和W1条件下, 泰山23和潍麦8号的阶段耗水量和耗水模系数为开花至成熟>播种至拔节>拔节至开花, 山农12为播种至拔节>开花至成熟>拔节至开花。W2条件下, 3个品种的阶段耗水量和耗水模系数为开花至成熟>播种至拔节>拔节至开花; 播种至拔节和拔节至开花的耗水模系数为泰山23>山农12>潍麦8号, 此阶段的耗水量和耗水强度为泰山23品种最高; 开花至成熟的耗水模系数为潍麦8号>山农12>泰山23, 此阶段的耗水量和耗水强度为泰山23品种最低。(3) 在W0和W1条件下, 总耗水量和灌水量、降水量及土壤耗水量占总耗水量的百分率为泰山23品种居中; W2条件下, 灌水量和降水量占总耗水量的百分率为泰山23>潍麦8号>山农12, 土壤耗水量及其占总耗水量的百分率反之, 但泰山23的总耗水量最低。(4) 同一灌水条件下, 泰山23品种100~200cm土层的土壤耗水量高于潍麦8号, 表明该品种能充分利用深层土壤水; 山农12品种在W0和W2条件下, 100~200cm土层的土壤耗水量高于泰山23和潍麦8号, 但其籽粒产量和水分利用效率显著低于上述两品种。

关键词: 小麦; 品种; 耗水特性; 籽粒产量; 水分利用效率

文章编号: 1000-0933(2009)12-6552-09 中图分类号: S512.1 文献标识码: A

Water consumption characteristics and water use efficiency of different wheat cultivars with high yield

WANG De-Mei¹, YU Zhen-Wen^{1,*}, XU Zhen-Zhu²

1 Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6552 ~ 6560.

Abstract: Water resource shortage is not only a critical environmental problem, but also a limiting factor severely affecting growth and yield of wheat. How to increase the yield and water use efficiency (WUE) of wheat has become a stringent problem to be solved. The aim of this research is to study differences of water consumption characteristics and WUE between six winter wheat cultivars (J17, T23, J22, Z12, S12, and W8) in high yield field to elucidate water consumption characteristics of cultivars with high WUE. Three irrigation regimes were applied in the present experiment: no irrigation water applied during the whole growth season (repressed as W0); irrigated both before sowing and at jointing stage (W1); irrigated 3 times, before sowing, at jointing and anthesis stage (W2). The irrigation amount each time was 60mm.

Based on the cluster analysis of grain yield and WUE, these six cultivars can be divided into three groups: high WUE

基金项目: 国家农业部小麦现代农业产业技术体系资助项目(ncytx-03); 国家自然科学基金资助项目(30871478)

收稿日期: 2008-08-20; 修订日期: 2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuzw@sdau.edu.cn

group (Group I), middle WUE group (Group II), low WUE group (Group III). The results showed that grain yield of Group I was significantly higher than those of other groups in the same irrigation treatment. However, there was no significant difference of grain yield between Group II and III in treatment W0, while grain yield of Group II was higher than those of Group III in treatment W1 and W2. Selecting T23, W8, S12 from group I, II, III respectively for further analysis, the results indicated that, in treatment W0 and W1, water consumption amount and water consumption percentage from anthesis to maturity were greatest, following by those from sowing to jointing, and from jointing to anthesis for T23 and W8, respectively; and for S12, the descending order of the two parameters was those from sowing to jointing, from anthesis to maturity, and from jointing to anthesis, respectively. In the condition of W2 treatment, water consumption amount and water consumption percentage from sowing to jointing of the three cultivars were all less than those of anthesis to maturity, but more than those of jointing to anthesis. Compared with W8 and S12, water consumption amount, water consumption percentage and water consumption amount per day from sowing to jointing and from jointing to anthesis for T23 were highest in treatment W2, whereas those from anthesis to maturity were lowest. Total water consumption amount of T23 was moderate between that of W8 and S12 in treatment W0 and W1 and the ratios of irrigation amount, precipitation and soil water consumption amount to total water consumption amount do the same. In treatment W2, the ratios of irrigation amount and precipitation to total water consumption amount for W8 were less than those of T23, but more than those of S12, whereas a opposite change occurred in the ratio of soil water consumption amount to total water consumption amount. However, total water consumption amount for T23 was lowest among three cultivars in treatment W2. Under the same condition of irrigation treatment, soil water consumption of 100–200cm soil layer of T23 was more than that of W8, showing that T23 could adequately use deep soil layer water. Soil water consumption of 100~200cm soil layer for S12 was more than those of T23 and W8 in treatment W0 and W2, but grain yield and WUE of S12 were significantly lower than those of other two cultivars. It is suggested that water consumption characteristics and water use efficiency in high yield wheat field may strongly depend on different cultivars.

Key Words: wheat; cultivar; water consumption characteristics; grain yield; water use efficiency

水资源缺乏已成为限制粮食生产的重要因子^[1,2]。Rampino 等^[3]指出水资源不足不仅是一项严重的环境问题,也是影响作物正常生长发育和产量形成的限制因素。据统计,近 40a 来,我国因干旱缺水而造成粮食减产总计近 1 亿 t^[1]。如何在有限灌溉条件下提高作物的产量和水分利用效率是亟待解决的问题。

同一作物的不同品种在高用水方面存在较大的生理和遗传差异^[4~8],冠层温度偏低的小麦品种的产量和水分利用效率高,冠层温度偏高的品种的则反之^[9],灌浆中后期冠层温度每升高 1℃,旱地冬小麦产量减少近 280kg·hm⁻²,水分利用效率下降约 0.6 kg·hm⁻²·mm⁻¹^[10]。小麦品种的产量水分利用效率与产量、收获指数呈显著正相关,与品种的开花时间和旗叶比叶重的倒数有一定的正相关关系^[11];根系的分布与发育亦显著影响小麦品种的水分利用效率^[12]。Radin 等^[13]指出任何影响光合和蒸腾生理过程的因素都会不同程度地影响水分利用效率。随着人们的不断研究发现,从植物自身出发,提高作物本身的水分利用效率是实现作物高效用水的基础,这需要研究植物水分代谢的规律及机制^[14]。在小麦耗水特性和水分利用效率方面,前人的研究多为利用 1~2 个品种探讨影响水分利用效率的因子及其机理,对高产条件下,不同产量水平和水分利用效率的小麦品种的耗水特点的研究尚少,这一研究对揭示不同小麦品种水分利用效率存在差异的机制有重要意义。为此本试验以 6 个小麦品种为材料,研究不同灌水条件下小麦品种水分利用效率的差异,旨在明确高产高水分利用效率小麦品种的耗水特点,为小麦节水高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2006~2007 年在山东省泰安市山东农业大学实验农场进行,试验点位于东经 117°9',北纬 36°9',

属暖温带大陆性半湿润季风气候区。小麦播种前试验田 0~20cm 土层土壤养分含量为:有机质 1.42%,全氮 0.13%,碱解氮 85.7mg·kg⁻¹,速效磷 38.2 mg·kg⁻¹,速效钾 99.63 mg·kg⁻¹。播前 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180、180~200cm 土层的土壤含水量分别为 13.9%、16.5%、18.5%、17.4%、18.3%、22.5%、23.5%、24.5%、24.8%、25.4%。小麦生育期总降水量 171.3mm,分别为:播种至冬前期 12.5 mm、冬前至拔节期 40.2 mm、拔节至开花期 11.5 mm、开花至成熟期 107.1 mm。

灌水处理为全生育期不灌水(W0)、底墒水+拔节水(W1)、底墒水+拔节水+开花水(W2);每次灌水 60mm,用水表控制灌水量。6 个供试品种为济南 17、泰山 23、济麦 22、淄麦 12、山农 12、潍麦 8 号。小区面积为 4m×2m,随机区组排列,3 次重复,小区间设立 1.5 m 的隔离区。播前每公顷基施纯氮 105kg、P₂O₅105kg、K₂O135kg,拔节期每公顷追施纯氮 105kg;氮肥为尿素(含氮 46%),磷肥为磷酸二铵(含 P₂O₅46%),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 52%)。2006 年 10 月 13 日播种,3 叶 1 心期定苗,基本苗为 180 株·m⁻²,其余管理措施同丰产田。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤含水量的测定

在小麦主要生育时期用土钻取 0~200cm 土层土样,20cm 为 1 层,置于铝盒,称鲜土重后于 105℃ 下烘至恒重,称干重,计算土壤质量含水量。

1.2.2 耗水量的计算方法

耗水量采用农田水分平衡法^[15]:根据本试验地自然条件,地势平坦,可视地表径流为零;地下水埋深 4m 以下,可视为地下水补给量为零;降水入渗深度不超过 2m,可视深层渗漏为零。因此,水分平衡方程式为:

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

式中,ETa 为作物生育期耗水量(mm),包括植株蒸腾量与棵间蒸发量;P 为降水量(mm);I 为灌溉量(mm);ΔW 为作物不同生育时期之间的土壤贮水变化量,即土壤贮水消耗量。土壤贮水量:

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

式中,W 为不同深度土壤贮水量(mm);r 为土壤相对含水量(%);v 为土壤平均容重(g·cm⁻³);h 为土层深度(cm);0.1 为换算系数。

1.2.3 水分利用效率的计算方法

$$\text{水分利用效率 (kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = \text{籽粒产量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{作物全生育期耗水量 (mm)}^{[16]}$$

$$\text{灌水利用效率 (kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = \text{籽粒产量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{灌水量 (mm)}$$

$$\text{降水利用效率 (kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = \text{籽粒产量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{降水量 (mm)}$$

$$\text{土壤水利用效率 (kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = \text{籽粒产量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{土壤耗水量 (mm)}$$

1.3 数据分析

以成熟期不同品种小麦的籽粒产量和水分利用效率为指标,用 DPS 7.5 数据分析软件进行数据标准化转化,根据欧氏距离的大小,运用最长距离法,对供试品种作聚类分析。采用 Microsoft Excel 2003 处理数据、图表,DPS7.5 数据分析软件进行数据统计分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种籽粒产量和水分利用效率的差异

由表 1 看出,不同品种小麦的籽粒产量均随灌水量的增加而增加,表现为 W2 > W1 > W0;水分利用效率泰山 23、济麦 22、淄麦 12、潍麦 8 号为 W0 > W1、W2,济南 17、山农 12 为 W1 > W0 > W2。同一灌水条件下,品种间的籽粒产量及其水分利用效率差异显著。不同灌水处理条件下,籽粒产量的变异系数为 5.0%~8.5%;水分利用效率的变异系数为 6.4%~11.3%。表明水分利用效率受灌水的影响程度显著高于籽粒产量所受的影响。

依据籽粒产量和水分利用效率 2 个因子对供试品种进行聚类分析(图 1),将供试品种分为高水分利用效

率组(Ⅰ组)、中水分利用效率组(Ⅱ组)和低水分利用效率组(Ⅲ组)。同一灌水条件下的籽粒产量,Ⅰ组显著高于Ⅱ组和Ⅲ组;Ⅱ组和Ⅲ组在 W0 处理条件下无显著差异,在 W1 和 W2 条件下,Ⅱ组显著高于Ⅲ组。

表 1 不同品种的籽粒产量及水分利用效率差异
Table 1 Differences between different cultivars in grain yield and yield water use efficiency

组 Group	品种 Cultivar	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)				水分利用效率 WUE(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)			
		W0	W1	W2	Mean	W0	W1	W2	Mean
高水分利用效率组(Ⅰ组) High WUE group (Group I)	泰山 23 T23	6312b	8097a	8397ab	7602b	21.9c	19.7b	18.8a	20.1b
	济麦 22 J22	6494a	7959b	8851a	7768a	24.5a	21.3a	17.6b	21.1a
	均值 Mean	6403	8028	8624	7685	23.2	20.5	18.2	20.6
中水分利用效率组(Ⅱ组) Medium WUE group (Group II)	淄麦 12 Z12	5749e	6838d	8352b	6980d	22.0c	17.8f	19.2a	19.7c
	潍麦 8 号 W8	5946d	7735c	7825c	7168c	22.5b	18.4e	17.1b	19.3d
	均值 Mean	5847	7286	8088	7074	22.2	18.1	18.1	19.5
低水分利用效率组(Ⅲ组) Low WUE group (Group III)	济南 17 J17	5986c	6761e	7731cd	6826e	18.5d	19.2c	16.1c	17.9e
	山农 12 S12	5751e	6811d	7353d	6638f	18.4d	18.7d	14.8d	17.3f
	均值 Mean	5868	6786	7542	6732	18.5	19.0	15.4	17.6
均值 Mean		6039.7	7366.8	8084.8	7163.7	21.3	19.2	17.3	19.2
变异系数 CV(%)		5.0	8.5	6.7	6.2	11.3	6.4	9.6	7.3

WUE: 水分利用效率 Water use efficiency; 同一列数字无相同字母间差异达 5% 的显著水平;下同 Values without the same letters in the same column are significant at 5% level; the same below

2.2 不同小麦品种总耗水量、阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度的差异

从Ⅰ组、Ⅱ组和Ⅲ组中分别取 1 个品种,泰山 23、潍麦 8 号和山农 12 进一步分析。3 个品种的总耗水量均以 W0 条件下最低,随灌水量增加,总耗水量显著增加(表 2)。结合表 1 结果分析表明,在 W0 和 W1 条件下,泰山 23 的籽粒产量最高,但总耗水量居中;在 W2 条件下,泰山 23 的籽粒产量最高,总耗水量最低。表明泰山 23 品种在不灌水和灌水量较少的条件下,能高效地利用土壤水和降水,获得较高的籽粒产量;在灌水量充足的条件下,能高效地利用灌溉水,发挥该品种的产量潜力。

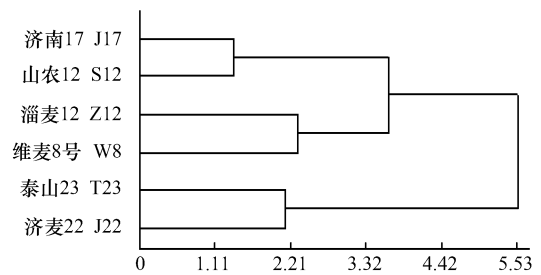


图 1 供试品种聚类图
Fig. 1 Dendrogram of test wheat cultivars

表 2 不同品种总耗水量、阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度的差异

Table 2 Differences of total water consumption amount, water consumption rate, water consumption percentage and water consumption per day of different cultivars

处理 Treatments	品种 Cultivars	总耗水量 TWCA (mm)	播种-拔节 Sowing to jointing			拔节-开花 Jointing to anthesis			开花-成熟 Anthesis to maturity		
			CA	CP	CD	CA	CP	CD	CA	CP	CD
W0	泰山 23 T23	288.3h	118.6e	41.1a	0.7b	41.3e	14.3i	1.7f	128.4f	44.5e	3.2f
	潍麦 8 号 W8	264.9i	97.3f	36.7c	0.6c	55.9d	21.1e	2.2e	111.7g	42.2f	2.8g
	山农 12 S12	311.9g	121.0d	38.8b	0.7b	81.7c	26.2a	3.3c	109.1g	35.0h	2.7g
W1	泰山 23 T23	410.6e	143.3a	34.9d	0.8a	100.1a	24.4c	4.0a	167.3e	40.7g	4.2e
	潍麦 8 号 W8	420.6d	125.4c	29.8f	0.7b	79.4c	18.9f	3.2d	215.9c	51.3c	5.4c
	山农 12 S12	363.6f	142.4ab	39.2b	0.8a	91.9b	25.3b	3.7b	129.3f	35.6h	3.2f
W2	泰山 23 T23	446.1c	142.7ab	32.0e	0.8a	100.1a	22.4d	4.0a	203.3d	45.6d	5.1d
	潍麦 8 号 W8	458.1b	125.0c	27.3h	0.7b	80.3c	17.5h	3.2d	252.7b	55.2a	6.3b
	山农 12 S12	497.7a	141.8b	28.5g	0.8a	92.2b	18.5g	3.7b	263.8a	53.0b	6.6a

TWCA: 总耗水量;CA: 阶段耗水量;CP: 耗水模系数;CD: 耗水强度; TWCA: Total water consumption amount; CA: Water consumption amount of growth period; CP: Water consumption percentage (Water consumption amount of growth period/Total water consumption amount); CD: Water consumption amount per day (Water consumption amount of growth period/ Days of growth period)

在 W0 和 W1 条件下,泰山 23 和潍麦 8 号的阶段耗水量和耗水模系数表现为开花至成熟 > 播种至拔节 > 拔节至开花,耗水强度为开花至成熟 > 拔节至开花 > 播种至拔节;山农 12 的阶段耗水量和耗水模系数为播种至拔节 > 开花至成熟 > 拔节至开花,耗水强度为拔节至开花 > 开花至成熟 > 播种至拔节。在 W2 条件下,3 个品种的阶段耗水量和耗水模系数表现为开花至成熟 > 播种至拔节 > 拔节至开花,耗水强度为开花至成熟 > 拔节至开花 > 播种至拔节;播种至拔节和拔节至开花的耗水模系数为泰山 23 > 山农 12 > 潍麦 8 号,此阶段的耗水量和耗水强度为泰山 23 品种最高;开花至成熟的耗水模系数为潍麦 8 号 > 山农 12 > 泰山 23,耗水量和耗水强度为泰山 23 品种最低。

2.3 不同小麦品种 0~200cm 土层土壤耗水量的差异

图 3 示出,在 0~200cm 土层内,随土壤深度的增加,土壤耗水量呈单峰趋势变化。W0 条件下,3 个品种土壤耗水量的最大差异出现在 100~140cm 土层,为山农 12 > 泰山 23 > 潍麦 8 号。W1 条件下,0~100cm 土层的土壤耗水量为潍麦 8 号 > 泰山 23 > 山农 12;100~200cm 土层的土壤耗水量为泰山 23 > 潍麦 8 号 > 山农 12。W2 条件下,0~100cm 土层的土壤耗水量为潍麦 8 号 > 山农 12 > 泰山 23;100~200cm 土层的土壤耗水量为山农 12 > 泰山 23 > 潍麦 8 号。结合表 1 分析表明,同一灌水条件下,泰山 23 品种 100~200cm 土层的土壤耗水量高于潍麦 8 号,表明该品种能充分利用深层土壤水;山农 12 品种在 W0 和 W2 条件下,100~200cm 土层的土壤耗水量高于泰山 23 和潍麦 8 号,但其籽粒产量显著低于上述两品种,其水分利用效率最低。

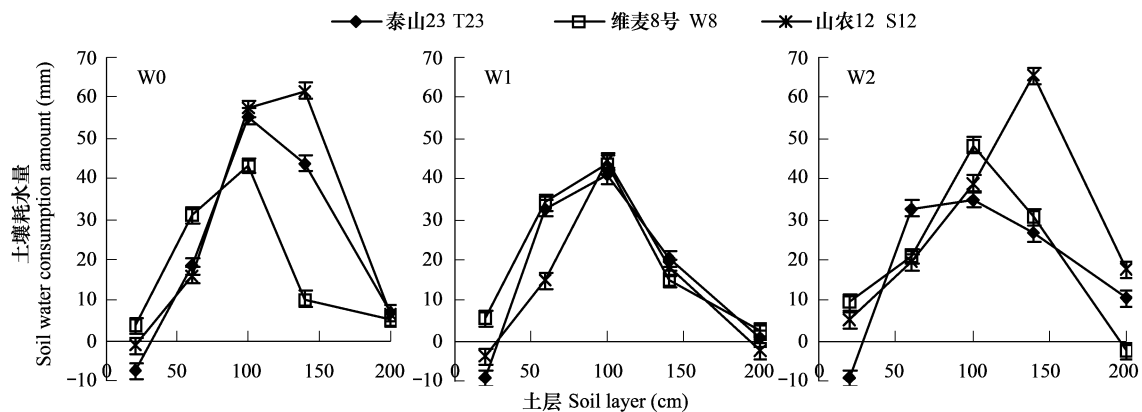


图 2 不同灌水条件下不同品种在 0~200cm 土层土壤耗水量的变化

Fig. 2 Changes of soil water consumption amount in 0~200cm soil layer of different cultivars in different treatments

2.4 不同小麦品种的耗水来源及其占总耗水量百分率的差异

表 3 示出,随灌水量增加,灌水量占总耗水量的百分率显著升高,降水量占总耗水量的百分率显著降低,土壤耗水量占总耗水量的百分率以 W0 条件下最高。不同品种各耗水来源的数量及其占总耗水量的百分率差异显著。W0 条件下,降水量占总耗水量的百分率为潍麦 8 号 > 泰山 23 > 山农 12,土壤耗水量及其占总耗水量的百分率为山农 12 > 泰山 23 > 潍麦 8 号。W1 条件下,灌水量和降水量占总耗水量的百分率为山农 12 > 泰山 23 > 潍麦 8 号,土壤耗水量及其占总耗水量的百分率为潍麦 8 号 > 泰山 23 > 山农 12。W2 条件下,灌水量和降水量占总耗水量的百分率为泰山 23 > 潍麦 8 号 > 山农 12,土壤耗水量及其占总耗水量的百分率为山农 12 > 潍麦 8 号 > 泰山 23。结合表 1 中籽粒产量为泰山 23 > 潍麦 8 号 > 山农 12 的结果表明,不灌水 (W0) 条件下,泰山 23 品种能够充分利用降水和土壤水,提高产量;灌水 (W1、W2) 条件下,泰山 23 品种能充分利用灌溉水和降水,减少对土壤水的消耗,获得高产,提高水分利用效率。

2.5 不同小麦品种各耗水来源水分利用效率的差异

由表 4 看出,3 个品种的灌水利用效率均随灌水量的增加显著降低;同一灌水条件下,泰山 23 品种的灌水利用效率最高。各水分处理的降水利用效率均以泰山 23 最高,潍麦 8 号居中,山农 12 最低。土壤水利用效率在 W0 条件下为潍麦 8 号 > 泰山 23 > 山农 12;W1 条件下为山农 12 > 泰山 23 > 潍麦 8 号;W2 条件下为

泰山 23 > 潍麦 8 号 > 山农 12,说明在不灌水(W0)和灌水较少(W1)的条件下,泰山 23 的土壤水利用效率比较高而且稳定,在灌水量充足(W2)条件下,其土壤水利用效率显著提高。水分利用效率在 W0 条件下为泰山 23、潍麦 8 号 > 山农 12,泰山 23 与潍麦 8 号无显著差异;W1 条件下为泰山 23 > 潍麦 8 号、山农 12,潍麦 8 号与山农 12 无显著差异;W2 条件下为泰山 23 > 潍麦 8 号 > 山农 12。表明灌水和降水的利用效率是决定不同小麦品种产量水分利用效率高低的关键因素;泰山 23 品种在不同灌水条件下之所以能够获得高的水分利用效率,其灌水和降水的利用效率高是一个重要原因。

表 3 不同小麦品种的耗水来源及其占总耗水量百分率的差异

Table 3 Differences of amount and ratio to total water consumption amount of different water resource in different cultivars							
品种 Cultivars	处理 Treatments	灌水量 Irrigation amount		降水量 Precipitation amount		土壤耗水量 SWCA	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
W0	泰山 23 T23	0	0	171.3	59.4b	117.0e	40.6b
	潍麦 8 号 W8	0	0	171.3	64.7a	93.6g	35.3c
	山农 12 S12	0	0	171.3	54.9c	140.6b	45.1a
W1	泰山 23 T23	120	29.2e	171.3	41.7e	119.4d	29.1e
	潍麦 8 号 W8	120	28.5f	171.3	40.7f	129.3c	30.7d
	山农 12 S12	120	33.0d	171.3	47.1d	72.3h	19.9h
W2	泰山 23 T23	180	40.4a	171.3	38.4g	94.8g	21.2g
	潍麦 8 号 W8	180	39.3b	171.3	37.4h	106.8f	23.3f
	山农 12 S12	180	36.2c	171.3	34.4i	146.4a	29.4e

SWCA: 土壤耗水量 Soil water consumption amount

表 4 不同小麦品种的各耗水来源的水分利用效率差异

Table 4 Differences of water use efficiency of different water resource in different cultivars					
品种 Cultivars	处理 Treatments	灌水利用效率 Irrigation WUE	降水利用效率 Precipitation WUE	土壤水利用效率 Soil water WUE	水分利用效率 WUE
		(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W0	泰山 23 T23	—	36.8f	54.0f	21.9a
	潍麦 8 号 W8	—	34.7g	63.6e	22.5a
	山农 12 S12	—	33.6h	40.9g	18.7bc
W1	泰山 23 T23	67.5a	47.3b	67.8d	19.7b
	潍麦 8 号 W8	64.5b	45.2c	59.8e	18.4c
	山农 12 S12	56.8c	39.8e	94.2a	18.4c
W2	泰山 23T23	46.6d	49.0a	88.6b	18.8bc
	潍麦 8 号 W8	43.5e	45.7c	73.3c	17.1d
	山农 12 S12	40.8f	42.9d	50.2f	14.8e

3 讨论

不同冬小麦品种因其生理生态特征的不同在产量和水分利用效率上存在显著差异,品种间产量相差 44.86%,水分利用效率相差 42.18%^[16~18]。不同品种随灌水量和灌水次数的增加,产量和水分利用效率变化趋势有显著不同,在一定灌水量范围内,产量和水分利用效率有一个最佳值^[17]。刘琳等^[19]对冬小麦新品种和老品种的研究表明,老品种以较大的根系生物量赢得了较高的竞争能力,消耗了较多的水分,而新品种虽然根系生物量较低,耗水量较少,籽粒产量却较高。本研究采用 6 个品种,依据其籽粒产量和水分利用效率 2 个因素,用聚类分析的方法将供试品种分为高水分利用效率组(Ⅰ组)、中水分利用效率组(Ⅱ组)和低水分利用效率组(Ⅲ组),结果表明同一灌水条件下的籽粒产量,Ⅰ组显著高于Ⅱ组和Ⅲ组,Ⅱ组和Ⅲ组在 W0 条件下无显著差异,在 W1 和 W2 条件下,Ⅱ组显著高于Ⅲ组,即本试验条件下水分利用效率高的品种籽粒产量亦较高。

隋鹏等^[20]研究指出节水抗旱型小麦耗水动态与喜水肥型品种相似,表现为前期耗水少,中后期耗水多的特点。覆膜条件下,小麦耗水关键时期在拔节到开花阶段,前期耗水量显著低于传统栽培^[21]。张旭东等^[22]认为无论冬、春小麦,最小耗水量一般均出现在播种至拔节时段,最大耗水量一般均出现在开花至乳熟时段。本试验结果表明,W0 和 W1 条件下,泰山 23 和潍麦 8 号的阶段耗水量和耗水模系数表现为开花至成熟 > 播种至拔节 > 拔节至开花;山农 12 为播种至拔节 > 开花至成熟 > 拔节至开花。W2 条件下,3 个品种的阶段耗水量和耗水模系数均为开花至成熟 > 播种至拔节 > 拔节至开花;播种至拔节和拔节至开花的耗水模系数为泰山 23 > 山农 12 > 潍麦 8 号,此阶段的耗水量和耗水强度为泰山 23 品种最高;开花至成熟的耗水模系数为潍麦 8 号 > 山农 12 > 泰山 23,耗水量和耗水强度为泰山 23 品种最低。上述结果说明泰山 23 品种对水分的调节能力较强,在不灌水和灌水量较少条件下,开花至成熟阶段耗水量多,有利于籽粒灌浆,提高粒重;播种至拔节阶段耗水量较多有利于小麦分蘖,培育壮苗。在灌水量充足的条件下,开花至成熟阶段耗水强度低、耗水量少于其他品种,有利于提高水分利用效率。

节水农业要解决的关键问题是提高自然降水和灌溉水的利用效率^[23],作物充分利用环境水和最大限度地节约本身用水相结合是实现作物高效用水的基本途径^[11]。Panda 等^[24]认为在一定的水分胁迫下,小麦可以获得较高的水分利用率,节约水分。有研究表明,随春季灌水量的减少,小麦生育期间的总耗水量降低,土壤水尤其是土壤深层贮水的利用率增加^[25],雨养麦田的耗水量中,土壤贮水消耗量占总耗水量的百分率为 50%,在降雨少而土壤贮水充足的年份,其占总耗水量的百分率达 60%^[26]。本研究结果表明,灌水和降水的利用效率是决定不同小麦品种产量水分利用效率高低的关键因素;泰山 23 品种在不同灌水条件下之所以能够获得高的水分利用效率,主要原因是该品种的灌水和降水的利用效率高。与潍麦 8 号和山农 12 相比,不灌水(W0)条件下,泰山 23 品种能够更好的利用降水和土壤水,获得较高的籽粒产量;灌水(W1、W2)条件下,泰山 23 品种能充分利用灌水和降水,减少对土壤水的消耗,获得高产,并提高水分利用效率。

郭清毅等^[27]研究指出 120 ~ 200cm 土层土壤水基本不受作物和气象因素的影响,比较稳定。张永科等^[28]在永寿旱原的大田研究表明,小麦对 0 ~ 100cm 土层土壤水的利用率最高为 70%,对 100 ~ 200cm 土层最高为 66%,0 ~ 200cm 土层最高为 48%,土层越深,土壤水的利用率越低。抗旱型小麦品种对土壤水分的利用率是相同灌水处理高水肥品种的 115%^[18]。本研究测定不同品种 0 ~ 200cm 土层土壤耗水量的结果表明,同一灌水条件下,泰山 23 品种在 100 ~ 200cm 土层的土壤耗水量高于潍麦 8 号,籽粒产量亦高于潍麦 8 号;山农 12 品种在 W0 和 W2 条件下,100 ~ 200cm 土层的土壤耗水量高于泰山 23 和潍麦 8 号,但其籽粒产量显著低于上述两品种,其水分利用效率最低,表明不同品种在水分利用效率方面存在显著差异,不同品种对水分吸收和利用差异的生理机制有待进一步研究。

References:

- [1] Zheng G P, Li J F, Qian Y D, Lü Y D, Liu L H, Wang B L. Evaluation on comprehensive drought resistant index of crops. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(10):109-121.
- [2] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. Planta, 2003, 218:1-14.
- [3] Rampino P, Pataleo S, Gerardi C, Mita G, Perrotta C. Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. Plant, Cell and Environment, 2006, 29: 2143-2152.
- [4] Rizza F, Badeck F W, Cattivelli L, Lidestri O, Di Fonzo N, Stanca A M. Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions. Crop Science, 2004, 44: 2127-2137.
- [5] Liu X Y, Luo Y P, Shi Y C. The stimulating effects of rewetting in subjecting to water stress on leaf area of winter wheat. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(4): 422-428.
- [6] Shao H B, Liang Z S, Shao M G, Sun S M, Hu Z M. Investigation on dynamic changes of photosynthetic characteristics of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes during two vegetative-growth stages at water deficit. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2005, 43: 221-227.
- [7] Zhang Z B, Shan L, Xu Q. Background analysis of chromosome controlling genetic of water use efficiency of Triticum. Acta Genetica Sinica, 2000,

27(3): 240—246.

- [8] Masle J, Gilmore S R, Farquhar G D. The erecta gene regulates plant transpiration efficiency in arabidopsis. *Nature*, 2005, 10: 1—5.
- [9] Xu Y P, Song S Y, Fan T L, Li X M, Xin P. Relationship of canopy temperature with grain yield and water use efficiency in various genotypes of dryland winter wheat during grain filling stage. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(3): 528—532.
- [10] Fan T L, Song S Y, Xu Y P, Li X M. Relationship between canopy temperature and water use efficiency/grain yield among dryland winter wheat genotypes during grain filling stage. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4491—4497.
- [11] Gao Y J, Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Pei D, Chen S L. Discrepancies of WUE of different winter wheat varieties and analysis of the interrelated factors. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(5): 45—49.
- [12] Feng G L, Liu C M. Analysis of root system growth in relation to soil water extraction pattern by winter wheat under water limiting conditions. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(3): 234—240.
- [13] Radin, J W. Reconciling water use efficiencies of cotton in field and laboratory. *Crop Science*, 1992, 32(1): 13—18.
- [14] Zhao M X, Zhou J B, Yang R, Zheng X F, Zhai B N, Li S X. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 143—149.
- [15] Jiang X D, Li Z J, Hou L T, Wang Y, Wang X, Yan H. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^- -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 20—24.
- [16] Zhang Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on grain quality, yield and soil NO_3^- -N content in different wheat varieties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 155—158, 174.
- [17] Dong B D, Zhang Z B, Liu M Y. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation scheduling. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 27—33.
- [18] Dong B D, Liu M Y, Zhang Z B, Zhang Y H, Li Q Q, Shi L, Zhou Y T. Studies on the agricultural traits and water use efficiency of winter wheat under different irrigation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 140—143.
- [19] Liu L, Xu B C, Li F M, Ma S C. Effects of soil water contents on competitive abilities and yield of two winter wheat cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3342—3349.
- [20] Sui P, Zhang H L, Xu C, Gao W S. Comparison of soil water consumption characteristics between drought-resistant and water-loving wheat varieties. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 26—31, 57.
- [21] Huang M J, Jin F S, Chi B L, Chen Q E. Study on characteristics of water consumption in winter wheat under plastic covering. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(2): 20—23.
- [22] Zhang X D, Ke X X, Yang X G, Wan X. The laws of wheat's water requirements and their distribution behavior in Hedong region of Gansu province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(1): 39—44.
- [23] Shan L, Xu M. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(1): 70—76.
- [24] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agricultural Water Management*, 2003, 63: 37—56.
- [25] Ju H, Lan X, Li J M, Zhou D X, Su B L. Effects of different irrigation systems on winter wheat yield and water consumption. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5): 23—29.
- [26] Zhou L Y. Water consumption and water use efficiency of wheat field in Fengqiu region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(supp.): 57—61.
- [27] Guo Q Y, Huang G B, Li G D, Yin C. Conservation tillage effects on soil moisture and water use efficiency of two phases rotation system with spring wheat and field pea in dryland. *Journal of Soil and Water Conservatio*, 2005, 19(3): 165—169.
- [28] Zhang Y K. An experimental research on water consumption laws of wheat in rained land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1989, 3: 54—65.

参考文献:

- [1] 郑桂萍, 李金峰, 钱永德, 吕艳东, 刘丽华, 王伯伦. 农作物综合抗旱性指标的评价分析. *中国农学通报*, 2005, 21(10): 109—121.
- [5] 刘晓英, 罗远培, 石元春. 水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 422—428.
- [7] 张正斌, 山仑, 徐旗. 控制小麦种、属旗叶水分利用效率的染色体背景分析. *遗传学报*, 2000, 27(3): 240—246.
- [9] 徐银萍, 宋尚有, 樊廷录, 李兴茂, 辛平. 旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系. *麦类作物学报*, 2007, 27(3): 528—532.
- [10] 樊廷录, 宋尚有, 徐银萍, 李兴茂. 旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系. *生态学报*, 2007, 27(11): 4491—4497.
- [11] 高延军, 张喜英, 陈素英, 孙宏勇, 裴冬, 陈四龙. 冬小麦品种间水分利用效率的差异及其影响因子分析. *灌溉排水学报*, 2004, 23(5): 45

~49.

- [12] 冯广龙,刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析. 自然资源学报,1998, 13(3): 234 ~ 240.
- [14] 赵满兴,周建斌,杨绒,郑险峰,翟丙年,李生秀. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143 ~ 149.
- [15] 江晓东,李增嘉,侯连涛,王芸,王雪,颜红. 少免耕对灌溉农田冬小麦夏玉米作物水、肥利用的影响. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20 ~ 24.
- [16] 张永丽,于振文. 灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响. 水土保持学报, 2007, 21(5): 155 ~ 158,174.
- [17] 董宝娣,刘孟雨,张正斌. 不同灌水对冬小麦农艺性状与水分利用效率的影响研究. 中国生态农业学报,2004,12(1): 140 ~ 143.
- [18] 董宝娣,张正斌,刘孟雨,张依章,李全起,石磊,周永田. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应. 农业工程学报,2007,23(9): 27 ~ 33.
- [19] 刘琳,徐炳成,李凤民,马守臣. 土壤水分对两个冬小麦品种产量和竞争能力的影响. 生态学报, 2007, 27(8): 3342 ~ 3349.
- [20] 隋鹏,张海林,许翠,高旺盛. 节水抗旱与喜水肥型小麦品种土壤水分消耗特性的比较研究. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 26 ~ 31, 57.
- [21] 黄明镜,晋凡生,池宝亮,陈奇恩. 地膜覆盖条件下旱地冬小麦的耗水特征. 干旱地区农业研究, 1999,17(2): 20 ~ 23.
- [22] 张旭东,柯晓新,杨兴国,万信. 甘肃河东小麦需水规律及其分布特征. 干旱地区农业研究,1999,17(1): 39 ~ 44.
- [23] 山仑,徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70 ~ 76.
- [25] 居辉,兰霞,李建民,周殿玺,苏宝林. 不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究. 中国农业大学学报, 2000, 5(5): 23 ~ 29.
- [26] 周凌云. 封丘地区小麦耗水量与水分利用效率研究. 应用生态学报, 1995, 6(supp.): 57 ~ 61.
- [27] 郭清毅,黄高宝, Guangdi Li, Yin Chan. 保护性耕作对旱地麦-豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响. 水土保持学报,2005,19(3): 165 ~ 169.
- [28] 张永科. 旱地冬小麦耗水规律的试验研究. 干旱地区农业研究,1989, 3: 54 ~ 65.