

# 矮秆基因 *Rht8* 和 *Rht13* 对冬小麦 水分利用效率的效应比较

王凤娇<sup>1,2</sup>, 严加坤<sup>3</sup>, 张岁岐<sup>1,3</sup>, 胡银岗<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以含有矮秆基因 *Rht8* 的冬小麦品种晋麦 47 与 *Rht13* 的供体 Magnif M1 杂交获得的含有不同矮秆基因的重组自交系  $ZX_{44}$  (*Rht8*)、 $ZX_{34}$  (*Rht13*)、 $ZX_{33}$  (*Rht8*+*Rht13*) 和  $ZX_{16}$  (*rht*) 为材料, 在田间和盆栽试验条件下主要研究了矮秆基因 *Rht8* 和 *Rht13* 对不同水分状况下冬小麦水分利用效率(WUE)和产量的影响。结果表明: 含有矮秆基因的三个品系  $ZX_{34}$ 、 $ZX_{44}$  和  $ZX_{33}$  与高秆对照系( $ZX_{16}$ ) 在田间和盆栽同一水分条件下的耗水量差异不显著。田间与盆栽的干旱条件下四种小麦品系的产量趋势均为  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{16} > ZX_{33}$ , 灌水条件下均为  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{33} > ZX_{16}$ 。田间干旱条件下四种小麦品系的产量 WUE 为  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{16} > ZX_{33}$ , 灌水条件下为  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{33} > ZX_{16}$ 。盆栽两种水分条件下的产量 WUE 趋势均为  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{16} > ZX_{33}$ 。 $ZX_{34}$  品系与  $ZX_{44}$  品系的产量 WUE 在田间相同水分条件下、盆栽干旱条件下差异不显著, 而在盆栽灌水条件下差异显著; 两者的收获指数在田间和盆栽试验的干旱和灌水条件下均较高。田间相同水分处理下四种小麦品系的生物量 WUE 差异不显著, 而盆栽相同水分条件下为  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{33} > ZX_{16}$ 。综上, 引入 *Rht8* 基因和 *Rht13* 基因均能明显提高产量和 WUE。在配合不断选育的基础上, 含有 *Rht13* 基因的冬小麦是半干旱地区小麦高 WUE 育种中的另一材料。

**关键词:** 冬小麦; 矮秆基因; 水分利用效率; 产量; 地上生物量

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)05-0343-07

## Comparison of the Effects of Dwarfing Genes *Rht8* and *Rht13* on Water Use Efficiency of Winter Wheat

WANG Fengjiao<sup>1,2</sup>, YAN Jiakun<sup>3</sup>, ZHANG Suiqi<sup>1,3</sup>, HU Yingang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Water shortage is a serious problem threatening sustainable agricultural development in Northwest China, where winter wheat (*Triticum aestivum* L.) is the largest water-consuming crop. The objective of this study was to explore the effects of dwarfing genes on the water use efficiency (WUE) and yield of winter wheat in Yangling area. Four recombinant inbred lines ( $ZX_{44}$ : *Rht8*;  $ZX_{34}$ : *Rht13*;  $ZX_{33}$ : *Rht8*+*Rht13* and  $ZX_{16}$ : *rht*) of winter wheat Jinmai 47 (*Rht8*) and Magnif M1 (*Rht13*) were studied in the field and pot experiments under drought and irrigation conditions. The results showed that the water consumptions of  $ZX_{44}$ ,  $ZX_{34}$  and  $ZX_{33}$  lines had no significant difference from that of compared with control line ( $ZX_{16}$ ) under the same water condition in the field and pot experiments. The yields of four wheat lines in the field experiment under drought condition decreased in the order:  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{16} > ZX_{33}$ , and their yields decreased in the order:  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{33} > ZX_{16}$  in the field experiment under irrigation condition. The trend of yields of four wheat lines in the field experiment under drought and irrigation conditions was consistent with them in the

收稿日期: 2016-01-11

修回日期: 2016-02-18

资助项目: 国家科技支撑计划“黄土高原旱区增粮增效潜力与提升技术研究”(2015BAD22B01)

第一作者: 王凤娇(1990—), 女, 新疆阿克苏人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: fengjiaow@126.com

通信作者: 张岁岐(1966—), 男, 陕西岐山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

pot experiment under drought and irrigation condition. The yield WUE of four wheat lines at yield level in the field experiment under drought condition decreased in the order:  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{16} > ZX_{33}$ , and decreased in the order of  $ZX_{44} > ZX_{34} > ZX_{33} > ZX_{16}$  under irrigation condition. The trend of yield WUE of four wheat lines in the pot experiment under both drought and irrigation condition decreased in the order:  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{16} > ZX_{33}$ . The yield WUE of  $ZX_{34}$  line and  $ZX_{44}$  line had no significant difference under the same water condition in the field experiment and also had no significant difference under drought condition in the pot experiment, but the difference was significant under irrigation condition in the pot experiment. The harvest indices of  $ZX_{34}$  line and  $ZX_{44}$  line were higher under two water condition in the field and pot experiments. The WUE at aboveground biomass level of four wheat lines had no significant difference under the same water condition in the field experiment. The WUE at aboveground biomass level of four wheat lines in the pot experiment under both drought and irrigation conditions decreased the order:  $ZX_{34} > ZX_{44} > ZX_{33} > ZX_{16}$ .  $ZX_{44}$  line and  $ZX_{34}$  line showed the highest yield WUE under the two water status in the field and pot experiments, respectively. Compared with the control,  $ZX_{44}$  and  $ZX_{34}$  lines presented higher WUE at aboveground biomass level under irrigation condition in the field treatment and appeared under two water status in the pot condition. In conclusion, the yield and WUE of winter wheat can be improved obviously by the introduction of *Rht8* gene and *Rht13* gene. Winter wheat carrying with *Rht13* gene is another material of wheat breeding with high WUE in semi-arid areas on the basis of combining with continuous selection.

**Keywords:** winter wheat; dwarfing gene; water use efficiency; yield; aboveground biomass

随着全球气候变暖及人口增长带来的水资源短缺的加剧,可用于粮食生产的水资源越来越有限,因此提高小麦的抗旱节水性,合理有效利用有限的水资源,充分挖掘小麦产量潜力已成为当前小麦育种面临的重大问题<sup>[1]</sup>。澳大利亚在 20 世纪 80 年代就提出将提高水分利用效率(WUE)作为一个明确的小麦育种目标<sup>[2]</sup>。自 20 世纪 60 年代矮秆基因(*Rht1* 和 *Rht2*)被用于小麦(*Triticum aestivum* L.)育种以来,小麦的矮化育种已成为高产育种的一条主要途径<sup>[3]</sup>。矮秆、半矮秆品种的选育和推广,掀起了小麦育种的“绿色革命”<sup>[4]</sup>。根据 Worland 报道,全球种植的商业小麦品种 80% 包含 *Rht-B1b* 或 *Rht-D1b* 基因<sup>[5]</sup>。然而,含有这两种矮生型等位基因的小麦品种只有在良好的管理、充足的土壤水分和肥力条件下才能表现出较强的增产潜力;在水分亏缺的地区增产效果不显著<sup>[6-7]</sup>。现已命名的小麦主效矮秆基因有 25 个,但研究大都集中在 *Rht1*, *Rht2*, *Rht3*, *Rht8*, *Rht9*, *Rht10* 和 *Rht12* 上<sup>[8]</sup>。*Rht8* 来源于日本地方品种赤小麦(*Akakomugi*),位于 2 号染色体的短臂上,被广泛应用于干旱环境下的小麦育种<sup>[9-10]</sup>。*Rht13* 从小麦突变体 Magnif M1 中鉴定出来,属于赤霉素敏感型隐性基因,具有增加籽粒数和产量的作用<sup>[11-12]</sup>。*Rht13* 基因对株高的影响比 *Rht-B1b* 和 *Rht-D1b* 强<sup>[13]</sup>。Richards 对 *Rht1*, *Rht2* 和 *Rht3* 的近等基因系研究表明,WUE 与春小麦的株高相关,盆栽和田间试验均表明 WUE 随株高的降低而降低,含有 2 个矮秆基

因的品系对干旱更为敏感;而高秆和矮秆系在水分吸收方面几乎无差异<sup>[14]</sup>。Ehdaie 和 Waines 对巴西含 *Rht1*, *Rht2* 和 *Rht3* 近等基因系的春小麦品种 Maringa 的研究表明,在水分充足的温室条件下,地上干物质量、籽粒产量、蒸腾速率(地上部干重/蒸腾水分)和产量水平 WUE(籽粒产量/耗水量)也均随株高的降低而降低<sup>[15]</sup>。含不同矮秆基因小麦的 WUE 存在着差异<sup>[14-15]</sup>。近期关于 *Rht13* 基因的研究主要集中在自然条件下其对株高和农艺性状的影响<sup>[12,16-17]</sup>,而其对小麦产量及水分利用效率的影响尚不清楚。

本研究的主要目的是采取田间试验和盆栽试验相结合,综合比较和探讨 *Rht13* 基因对不同水分状况下冬小麦水分利用效率和产量的影响,并与 *rht* 基因及 *Rht8* 基因相比较,评估其在半干旱地区小麦育种中应用的可能性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

从旱地冬小麦品种晋麦 47(含 *Rht8*)与小麦 *Rht13* 基因的供体 Magnif M1 杂交的高代株系中,选取分别含有单个矮秆基因 *Rht8*( $ZX_{44}$ )和 *Rht13*( $ZX_{34}$ ),双矮秆基因 *Rht8* + *Rht13*( $ZX_{33}$ )及无矮秆基因的高秆系  $ZX_{16}$ (*rht*)为试验材料。试验材料由西北农林科技大学农学院胡银岗教授提供。

### 1.2 田间试验

田间试验于 2014 年 10 月—2015 年 6 月在陕西

杨凌中国科学院水土保持研究所试验农场的大型活动防雨棚内和棚外进行。播种期为 2014 年 10 月 10 日,收获期为 2015 年 6 月 4 日。播前施底肥 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup>。设干旱处理(返青期前有降雨无灌水,返青期至收获无灌水无降雨)和棚外灌水处理(全生育期正常降雨,越冬期灌水,灌水量相当于 70 mm 降水)。小麦全生育期的降水量为 195.77 mm,分布见图 1。采用随机区组试验设计,每个处理 3 个重复,共 24 个小区。每个小区面积为 3.3 m × 2.2 m,株距 2 cm,行距 20 cm。

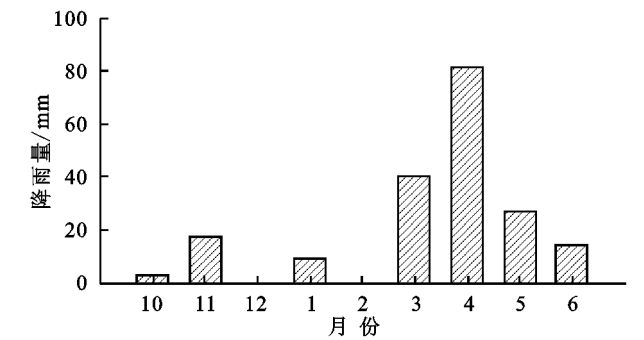


图 1 试验区 2014—2015 年冬小麦生育期月降雨量

### 1.3 盆栽试验

盆栽试验于 2014 年 10 月—2015 年 5 月在水保所防雨棚内进行。播种期为 2014 年 10 月 21 日,收获期为 2015 年 5 月 25 日。播种前种子用次氯酸钠浸泡消毒,于恒温培养箱催芽后播于高 27 cm、直径 29 cm 的聚乙烯盆栽桶中,每桶装风干土 14.5 kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3 g 和尿素 6 g,充分混匀。每桶 12 穴,定苗后保留 12 株,每处理 4 个重复。播种至返青期期间土壤含水量均保持为田间持水量的 70%~80%。返青期开始控水,设干旱处理(返青后土壤含水量为田间持水量的 35%~45%)和灌水处理(返青后土壤含水量为田间持水量的 70%~80%),称重法控制盆栽土壤含水量。

### 1.4 测试项目及方法

1.4.1 产量的测定 田间各小区在成熟期收割用于测产的 1 m<sup>2</sup> 的小麦。风干后记录产量、千粒重、穗数及穗粒数。盆栽每个小麦品系的四个重复均用于测产,常规考种。

1.4.2 水分利用效率(WUE)的计算 田间土壤水分测定通过 CNC100 型中子仪分别于播种前、返青期和收获期进行。

田间 WUE 的计算公式为:

$$WUE_y = Y/ET$$

$$WUE_{bm} = B_m/ET$$

式中:WUE<sub>y</sub> 表示产量水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup>·mm)];Y 表示小麦籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>);ET 表示田间耗水量(mm);WUE<sub>bm</sub> 表示生物量水分利用效率[kg/

(hm<sup>2</sup>·mm)];B<sub>m</sub> 表示地上生物量(kg/hm<sup>2</sup>)。

田间耗水量由水量平衡公式计算:

$$ET = R - F \pm Q + \Delta W$$

式中:ET 表示作物蒸发蒸腾量(mm);R 表示降水量(mm),小麦生育期内降水为 195.77 mm。用放置于田间的雨量筒测得(水分胁迫处理位于干旱棚内,返青前期降雨量为 21.37 mm,返青期至成熟期降雨量为 0);I 表示灌水量(mm);F 表示地表径流(mm);Q 表示下界面渗漏量(mm),考虑到试验期间无地表径流发生,此处取 F=0, Q=0;ΔW 表示土壤贮水量的减少量(mm),用中子土壤水分仪测定的土壤含水量根据下式求得。

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (W_{1i} - W_{2i})$$

式中:i 表示土壤层次号数;n 表示土壤层次总数目。0—100 cm 每 10 cm 为一层次的容积含水率,100—200 cm 每 20 cm 为一层次的容积含水率,测定深度为 200 cm,因此 n 值为 15。为了方便水量平衡计算,将体积含水率换算为以 mm 为单位的土壤含水量 W;

$$W = \theta h / 100$$

式中:θ 为土壤容积含水率(%);h 为土层厚度(mm)。

盆栽试验从播种到成熟期的总耗水量(kg),由每次称重计算的耗水量累加而得。盆栽 WUE 测定:WUE<sub>bm</sub> 由每桶小麦地上部生物量(g)与每桶总耗水量(kg)之比来表示;WUE<sub>y</sub> 由每桶小麦籽粒产量(g)与每桶总耗水量(kg)之比来表示。

### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行相关数据计算,SPSS 18.0 软件对试验数据进行单因素显著性分析, Sigma Plot 12.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 矮秆基因对冬小麦产量及产量构成因子的影响

穗粒数、穗数和千粒重表征小麦产量潜力的大小。表 1 为田间干旱和灌水条件下矮秆基因对小麦产量构成因子的影响。可以看出,干旱条件下,四种小麦品系的穗粒数差异显著,ZX<sub>33</sub> 品系的穗粒数与对照系相比降低了 15.9%,而 ZX<sub>34</sub> 品系与 ZX<sub>44</sub> 品系的穗粒数均显著高于对照系,ZX<sub>44</sub> 品系高出更多。灌水条件下,ZX<sub>33</sub> 品系与对照系的穗粒数接近,ZX<sub>34</sub> 和 ZX<sub>44</sub> 品系的穗粒数均与对照系差异显著。田间干旱和灌水条件下,ZX<sub>44</sub> 品系的穗粒数均最高,其次是 ZX<sub>34</sub> 品系。在同一水分处理下,不同小麦品系的每 1 hm<sup>2</sup> 穗数差异不显著。在田间干旱条件下,ZX<sub>33</sub>, ZX<sub>34</sub> 和 ZX<sub>44</sub> 品系与对照系的产量差异不显著(表 2);ZX<sub>44</sub> 和 ZX<sub>34</sub> 品系比对照系的产量分别增加

了 31.7%和 23.2%，ZX<sub>33</sub> 品系减少了 14.6%；ZX<sub>33</sub> 品系与 ZX<sub>34</sub>、ZX<sub>44</sub> 品系的产量差异均显著，可能与其较少的穗粒数有关。田间灌水条件下，ZX<sub>44</sub>、ZX<sub>34</sub> 和 ZX<sub>33</sub> 这三种品系与对照系的产量差异显著，分别比对照高出 39.7%、40.3%和 16.0%，ZX<sub>34</sub> 品系高出范围最大。较高的产量主要与较大的粒重、较多的穗粒数以及穗数有关。ZX<sub>16</sub> 品系虽然干旱和灌水条件下每 1 hm<sup>2</sup> 穗数较

多，但由于较少的穗粒数和籽粒较小导致产量较低。说明在田间干旱条件下 *Rht*8+*Rht*13 基因对小麦产量具有不利影响，但在灌水条件下却能提高产量。田间干旱条件下，ZX<sub>44</sub> 品系的产量最高，与 ZX<sub>34</sub> 品系无显著差异；灌水条件下 ZX<sub>34</sub> 品系的产量最高，与 ZX<sub>44</sub> 品系也无显著差异。*Rht*13 基因与 *Rht*8 基因在田间干旱和灌水条件下均能明显提高产量。

表 1 田间不同小麦品系产量构成

品系(基因)	穗粒数/粒		穗数/(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )		千粒重/g	
	干旱	灌水	干旱	灌水	干旱	灌水
ZX33( <i>Rht</i> 8+ <i>Rht</i> 13)	24.67d	33.92c	512.00a	582.67a	40.48ab	41.18b
ZX34( <i>Rht</i> 13)	37.42b	40.78b	464.33a	503.33a	39.92b	41.62b
ZX44( <i>Rht</i> 8)	44.08a	43.89ab	503.67a	473.67a	42.28a	44.21a
ZX16( <i>rht</i> )	29.33c	32.43c	531.67a	531.00a	37.41c	40.77b

注：不同字母表示同一水分处理下不同小麦品系在 0.05 水平上差异显著。下表同。

盆栽干旱条件下四种小麦品系的产量为 ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>16</sub> > ZX<sub>33</sub> (表 3)；灌水条件下为：ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>33</sub> > ZX<sub>16</sub>。在盆栽同一水分条件下 ZX<sub>44</sub> 品系的产量与 ZX<sub>34</sub> 品系差异不显著。田间干旱和灌水条件下产量最高的分别为 ZX<sub>44</sub> 和 ZX<sub>34</sub> 品系，而盆栽两种水分条件下，ZX<sub>34</sub> 品系的产量均最高，分别比对照系提高了 24.5%和 67.7%。说明 *Rht*8+*Rht*13 基因在盆栽干旱条件下对产量有不利影响，而在灌水条件下能提高产量；*Rht*13 和 *Rht*8 基因在盆栽干旱和灌水条件下均能增加小麦产量，尤其在灌水条件下这两个矮秆基因的增产能力更显著，与田间试验结果基本一致。

结合田间试验和盆栽试验结果，可得出 *Rht*13 和 *Rht*8 基因在这两种试验条件下对小麦品系的产量增长趋势基本一致。

2.2 矮秆基因对冬小麦地上生物量及收获指数的影响

由表 2 可知，各品系同一水分条件下的地上生物量无显著差异。干旱条件下四种小麦品系的地上生物量为 ZX<sub>16</sub> > ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>33</sub>，灌水条件下为

ZX<sub>16</sub> > ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>33</sub> > ZX<sub>34</sub>。说明地上生物量的高低可能与株高密切相关，矮秆基因降低了株高，地上生物量可能随着株高的降低而降低。在田间两种水分条件下，收获指数均为 ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>33</sub> > ZX<sub>16</sub>。说明矮秆基因能够提高收获指数。

盆栽与田间收获指数结果的趋势略有不同(表 3)。盆栽干旱和灌水条件下，均是 ZX<sub>34</sub> 品系的收获指数最高。四种小麦品系在干旱条件下收获指数无显著差异。ZX<sub>34</sub> 品系在灌水条件下的收获指数显著高于其他三种品系，这与灌水下其较高的产量有关。盆栽地上生物量结果的趋势与田间也略有不同，两种条件下 ZX<sub>34</sub> 品系的地上生物量均最高，其次是 ZX<sub>44</sub> 品系。盆栽干旱和灌水条件下地上生物量最低的分别为 ZX<sub>33</sub> 品系与对照系。

综合田间和盆栽试验结果，可得出 ZX<sub>34</sub> 品系和 ZX<sub>44</sub> 品系的收获指数均较高，而 ZX<sub>33</sub> 品系与对照系接近。四种小麦品系的在田间和盆栽的地上生物量趋势差异较大，可能与生长环境的不同有关。

表 2 田间不同小麦品系产量、地上生物量及收获指数

品系(基因)	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		地上生物量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		收获指数	
	干旱	灌水	干旱	灌水	干旱	灌水
ZX33( <i>Rht</i> 8+ <i>Rht</i> 13)	3667c	5457ab	11013a	13510a	0.33b	0.40ab
ZX34( <i>Rht</i> 13)	5287b	6600a	12843a	12877a	0.41a	0.45a
ZX44( <i>Rht</i> 8)	5653ab	6575a	12693a	14340a	0.45a	0.46a
ZX16( <i>rht</i> )	4293bc	4705b	13210a	14430a	0.32b	0.34b

表 3 盆栽不同小麦品系产量、地上生物量及收获指数

品系(基因)	产量/(g/盆)		地上生物量/(g/盆)		收获指数	
	干旱	灌水	干旱	灌水	干旱	灌水
ZX33( <i>Rht</i> 8+ <i>Rht</i> 13)	22.08b	26.64b	59.28b	74.64b	0.37a	0.36b
ZX34( <i>Rht</i> 13)	31.32a	43.68a	74.28a	95.28a	0.42a	0.46a
ZX44( <i>Rht</i> 8)	27.48b	40.20a	69.24b	91.44a	0.40a	0.44b
ZX16( <i>rht</i> )	22.32b	26.04b	61.56b	68.28b	0.41a	0.38b

2.3 矮秆基因对冬小麦水分利用效率的影响

田间试验条件下,四种小麦品系在同一水分处理下耗水量差异不显著(表 4)。各品系在干旱和灌水处理下的  $WUE_{bm}$  差异不显著,在干旱下,矮秆基因系的  $WUE_{bm}$  低于对照,  $ZX_{33}$  品系最低;灌水下三种矮秆系的  $WUE_{bm}$  均高于对照。在田间相同水分条件下,  $ZX_{33}$ ,  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_y$  与对照系差异不显著。但  $ZX_{33}$  品系在干旱条件下的  $WUE_y$  与  $ZX_{44}$  和  $ZX_{34}$  品系差异均显著。干旱条件下  $ZX_{33}$  品系的

$WUE_y$  与对照系相比降低了 14.4%;  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系分别比对照系增加了 22.3%和 29.3%。灌水条件下,  $ZX_{44}$ ,  $ZX_{34}$  和  $ZX_{33}$  品系的  $WUE_y$  分别比对照系增加了 47.2%, 40%和 20.0%。说明在干旱条件下, *Rht8*+*Rht13* 基因对  $WUE_y$  有不利影响,而 *Rht13* 和 *Rht8* 基因均有利于  $WUE_y$  的增加, *Rht8* 基因的增加能力更强。灌水条件下,矮秆基因均能够提高  $WUE_y$ , 顺序为: *Rht8*>*Rht13*>*Rht8*+*Rht13*>*rht*。

表 4 田间不同小麦品系耗水量与水分利用效率

品系(基因)	耗水量/mm		水分利用效率(产量水平)/ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ )		水分利用效率(生物量水平)/ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ )	
	干旱	灌水	干旱	灌水	干旱	灌水
$ZX_{33}(Rht8+Rht13)$	354.52a	562.95a	10.38b	10.22a	31.07a	25.27a
$ZX_{34}(Rht13)$	356.80a	550.04a	14.82a	11.93a	36.00a	26.79a
$ZX_{44}(Rht8)$	360.63a	559.37a	15.67a	12.54a	35.20a	27.25a
$ZX_{16}(rht)$	354.57a	552.07a	12.12ab	8.52a	37.36a	24.63a

表 5 为盆栽试验条件下不同小麦品系耗水量和水分利用效率的变化。在盆栽干旱条件下,四种小麦品系的耗水量无显著差异,  $ZX_{33}$ ,  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系的耗水量均低于对照系。在盆栽灌水条件下,  $ZX_{33}$ ,  $ZX_{44}$  和  $ZX_{34}$  品系与对照系的耗水量均无显著差异,  $ZX_{33}$  与  $ZX_{44}$  品系的耗水量差异显著。盆栽干旱和灌水条件下,四种小麦品系的  $WUE_y$  均表现为  $ZX_{34}$ > $ZX_{44}$ > $ZX_{33}$ > $ZX_{16}$ 。盆栽干旱条件下,  $ZX_{34}$  与  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_y$  无显著差异,二者分别比对照系的  $WUE_y$  高 41.7%和 25%;  $ZX_{33}$  品系的  $WUE_y$  与对照系无显著差异。灌水条件下,  $ZX_{34}$  品系与  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_y$  存在显著差异,二者分别比对照系高出 60%和 40%;  $ZX_{33}$  品系的  $WUE_y$  略高于对照系。干

旱下四种小麦品系的  $WUE_y$  均高于灌水条件。由此可见,盆栽干旱和灌水条件下  $ZX_{34}$  与  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_y$  均显著高于对照系,  $ZX_{34}$  品系更为明显,  $ZX_{33}$  品系与对照系差异不显著。盆栽干旱条件下,  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_{bm}$  无显著差异,两者分别明显高出对照系 25%和 22%,  $ZX_{33}$  品系的  $WUE_{bm}$  与对照系差异不显著。盆栽灌水条件下,  $ZX_{33}$ ,  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系的下  $WUE_{bm}$  均与对照系差异显著,分别比对照系高出 15.4%, 34.6%和 23.1%;  $ZX_{34}$  和  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_{bm}$  差异不显著。综上,盆栽干旱和灌水条件下  $ZX_{34}$  品系和  $ZX_{44}$  品系的  $WUE_{bm}$  和  $WUE_y$  均明显高于对照系,由此推断 *Rht8* 基因与 *Rht13* 基因显著提高了  $WUE_{bm}$  和  $WUE_y$ , *Rht13* 基因的增加能力更明显。

表 5 盆栽不同小麦品系耗水量和水分利用效率

品系(基因)	耗水量/kg		水分利用效率(产量水平)/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )		水分利用效率(生物量水平)/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	
	干旱	灌水	干旱	灌水	干旱	灌水
$ZX_{33}(Rht8+Rht13)$	15.14a	20.47b	1.46c	1.30c	3.92b	3.65b
$ZX_{34}(Rht13)$	15.43a	22.47b	2.03a	1.94a	4.81a	4.24a
$ZX_{44}(Rht8)$	14.81a	23.83a	1.86ab	1.69b	4.68a	3.84ab
$ZX_{16}(rht)$	15.79a	21.67b	1.41bc	1.20c	3.90b	3.15c

综上田间试验与盆栽试验结果分析,表明 *Rht13* 和 *Rht8* 基因均有利于  $WUE_y$  的增加,田间 *Rht8* 的增加能力更强,盆栽则为 *Rht13* 基因。盆栽的两种水分条件下四种小麦品系的  $WUE_{bm}$  呈现相同的趋势  $ZX_{34}$ > $ZX_{44}$ > $ZX_{33}$ > $ZX_{16}$ ,而田间试验下四种小麦品系的  $WUE_{bm}$  趋势没有盆栽明显。这可能与田间试验受到的天气和环境影响有关。

3 讨论

国内外诸多学者研究了 *Rht1*, *Rht2* 和 *Rht8* 对小麦产量和农艺性状的影响<sup>[9,17]</sup>,但对 *Rht13* 与 *Rht8* 的重组自交系的研究相对较少。Rebetzke 等<sup>[13]</sup>研究表明,相对于野生型(高秆)小麦,矮秆小麦收获指数均提高,增幅为 *Rht8*+*Rht13*>*Rht13*>

*Rht8*。而本研究田间干旱和灌水条件下、盆栽灌水条件下矮秆系的收获指数均高于对照系,与 Rebetzke 等的研究结果一致,但矮秆基因对收获指数的增加能力不同,田间干旱和灌水条件下均为  $Rht8 > Rht13 > Rht8 + Rht13$ ;盆栽灌水条件下为  $Rht13 > Rht8 > Rht8 + Rht13$ ;盆栽干旱条件下 *Rht13* 的增幅大于 *Rht8*, *Rht8 + Rht13* 则降低了收获指数,可能也与小麦的遗传背景和生态环境不同有关。而田间与盆栽试验结果的差异,可能与两者试验环境的不同有关。

不同矮秆基因对冬小麦品系产量和产量构成因子的影响不同。Rebetzke 等<sup>[18-19]</sup>认为赤霉素敏感的矮秆基因在降低株高的同时,有利于小麦穗粒数的增加;矮秆基因 *Rht13* 与增加穗粒数(27%)、籽粒产量(17.5%)、生物量(6.5%)和收获指数(12.1%)以及降低穗粒重(6.8%)相关。含 *Rht13* 基因小麦的 1 m<sup>2</sup> 穗数、产量和收获指数要显著高于含 *Rht8* 基因的小麦,而含有 *Rht8 + Rht13* 基因小麦的产量居中<sup>[13]</sup>。唐娜等的研究表明赤霉素敏感型矮秆基因 *Rht8* 对小麦品种的小穗数和千粒重没有不利影响,同时还增加了穗粒数<sup>[9]</sup>。而本研究也表明,*Rht8* 基因对千粒重没有不利影响。与对照系相比,*Rht8* 基因显著增加了穗粒数,且增加能力高于 *Rht13*。在田间干旱和灌水条件下,ZX<sub>44</sub> 品系和 ZX<sub>34</sub> 品系的产量分别最高,且二者差异不显著。两者在盆栽试验条件下的产量也均较高,ZX<sub>34</sub> 品系略高于 ZX<sub>44</sub> 品系。盆栽和田间试验均表明在干旱条件下 *Rht8 + Rht13* 基因降低了产量,而在灌水条件下增加了产量,增加能力低于 *Rht8* 和 *Rht13* 基因。可能是由于在干旱条件下含 *Rht8 + Rht13* 基因的小麦较早成熟导致产量较低。因此矮秆基因在水分充足的条件下对小麦有更好的产量收益,这与 Mathews<sup>[6]</sup> 研究结果相似。

WUE 是十分复杂的数量性状,对作物来说,直接与产量相关,受环境条件影响较大<sup>[20]</sup>。本试验结合田间和盆栽试验,比较不同小麦品系 WUE 的差异。国内外关于 *Rht13* 基因和 *Rht8* 基因对小麦 WUE 的影响鲜见报道,这方面主要集中在 *Rht1*, *Rht2* 和 *Rht3* 的近等基因系上。本研究田间和盆栽试验结果显示,四种小麦品系在同一水分处理下全生育期耗水量差异不显著,与 Richards 的研究结果矮秆小麦与高秆小麦的耗水量不存在显著差异相似<sup>[14]</sup>。Ehdaie 等的研究表明,来源于 Maringa 遗传背景的 *Rht1*, *Rht2* 和 *Rht3* 对 WUE 具有负效应<sup>[15]</sup>。本试验结果与此不同,在田间和盆栽的干旱条件下, *Rht8 + Rht13* 基因对产量 WUE 有不利影响,而 *Rht13* 基因和 *Rht8* 基因均能提高产量 WUE,田间增

加能力更强的为 *Rht8* 基因,盆栽则为 *Rht13* 基因。田间和盆栽灌水条件下,矮秆基因均能提高产量 WUE,田间试验条件下四种品系产量 WUE 顺序为: ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>33</sub> > ZX<sub>16</sub>;盆栽则为 ZX<sub>34</sub> > ZX<sub>44</sub> > ZX<sub>33</sub> > ZX<sub>16</sub>。说明在两种水分条件下,中等株高具有较高的产量 WUE,而在干旱条件下株高过高或过矮对产量 WUE 有不利影响。这与 Richards 的研究结果干旱条件下春小麦的 WUE 随株高的降低而降低不同<sup>[14]</sup>,可能由于小麦品种和生长环境的不同而不同。同时也说明矮秆基因在水分充足的条件下均能提高小麦产量 WUE。田间各品系在两种水分处理下的生物量 WUE 差异不显著;在干旱下,矮秆基因系的生物量 WUE 低于高秆系,ZX<sub>33</sub> 品系最低;而灌水条件下,矮秆系略高于高秆系。两种条件下矮秆基因系的生物量 WUE 较低均与其地上生物量低于高秆系有关。盆栽两种条件下,ZX<sub>44</sub> 品系的地上生物量显著高于对照系,可能与其籽粒产量较高有关。相比盆栽而言,田间的生物量 WUE 趋势较弱,可能与其受环境因素影响较大有关。

## 4 结论

本文通过田间和盆栽试验相结合的方式,研究了矮秆基因 *Rht13* 和 *Rht8* 对冬小麦产量及水分利用效率的影响。田间干旱条件下,*Rht8* 基因对产量的收益大于 *Rht13* 基因,而在水分充足的条件下, *Rht13* 基因带来更高的产量收益,而盆栽两种水分条件均是 *Rht13* 基因的增产能力大于 *Rht8* 基因。*Rht8 + Rht13* 基因使株高降低幅度最大,与高秆系相比,虽在大田和盆栽干旱下产量及产量水分利用效率有所降低,但在灌水条件下两种指标均有所提高。这也说明,矮秆基因在充足的水分条件下更能对小麦产量及水分利用效率产生有利影响。综上所述 *Rht8* 基因和 *Rht13* 基因均能较显著地提高产量和 WUE。在配合不断选育的基础上,含有 *Rht13* 基因的小麦是继 *Rht8* 之后在半干旱地区小麦高 WUE 育种中的另一材料。

本文的不足之处在于,相关结论仅基于一个地区和盆栽一年的试验结果。

### 参考文献:

- [1] 闫超,刘孟雨,董宝娣,等. 小麦水分利用效率及相关性状 QTL 研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(8):92-95.
- [2] 张正斌,徐萍,周晓果,等. 作物水分利用效率的遗传改良研究进展学[J]. 中国农业科,2006,39(2):289-294.
- [3] 于东海,李静,王秀芹,等. 小麦矮秆新基因的 RAPD 标记[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2006,37(3):

359-362.

[4] 贾继增,丁寿康,李月华,等. 中国小麦的主要矮秆基因及矮源的研究[J]. 中国农业科学,1992,25(1):1-5.

[5] Worland A J, Korzun V, Roder M S, et al. Genetic analysis of the dwarfing gene *Rht8* in wheat[J]. Part II. The distribution and adaptive significance of allelic variants at the *Rht8* locus of wheat as revealed by microsatellite screening [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1998,96(8):1110-1120.

[6] Mathews K L, Chapman S C, Trethowan R, et al. Global adaptation of spring bread and durum wheat lines near-isogenic for major reduced height genes [J]. Crop Science,2006,46(2):603-613.

[7] Sun Y, Wang X, Wang N, et al. Changes in the yield and associated photosynthetic traits of dry-land winter wheat (*Triticum aestivum* L.) from the 1940s to the 2010s in Shaanxi Province of China[J]. Field Crops Research,2014,167:1-10.

[8] Gale M D, Youssefian S. Dwarfing genes for wheat// Russell G E. Progress in Plant Breeding[M]. London: Butterworths and Co. ,1985.

[9] 唐娜,姜莹,何蓓如,等. 赤霉素敏感性不同矮秆基因对小麦胚芽鞘长度和株高的效应[J]. 中国农业科学, 2009,42(11):3774-3784.

[10] Gasperini D, Greenland A, Hedden P, et al. Genetic and physiological analysis of *Rht8* in bread wheat: an alternative source of semi-dwarfism with a reduced sensitivity to brassinosteroids [J]. Journal of experimental botany,2012,63(12):4419-4436.

[11] Ellis M H, Rebetzke G J, Azanza F, et al. Molecular mapping of gibberellin-responsive dwarfing genes in bread wheat [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2005,111(3):423-430.

[12] Rebetzke G J, Ellis M H, Bonnett D G, et al. The *Rht13* dwarfing gene reduces peduncle length and plant height to increase grain number and yield of wheat[J]. Field Crops Research,2011,124(3):323-331.

[13] Rebetzke G J, Ellis M H, Bonnett D G, et al. Height reduction and agronomic performance for selected gibberellin-responsive dwarfing genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Field Crops Research, 2012,126:87-96.

[14] Richards R A. The effect of dwarfing genes in spring wheat in dry environments. I: Agronomic characteristics [J]. Crop and Pasture Science, 1992,43(3):517-527.

[15] Ehdaie B, Waines J G. Growth and transpiration efficiency of near-isogenic lines for height in a spring wheat[J]. Crop Science,1994,34(6):1443-1451.

[16] Wang Y, Chen L, Du Y, et al. Genetic effect of dwarfing gene *Rht13* compared with *Rht-D1b* on plant height and some agronomic traits in common wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Field Crops Research, 2014,162:39-47.

[17] 李杏普,兰素缺,张京慧,等. *Rht8*,*Rht10* 和 *Rht12* 矮秆基因对产量构成因子的影响[J]. 华北农学报,2009, 24(Z2):72-75.

[18] Rebetzke G J, Richards R A, Fischer V M, et al. Breeding long coleoptile, reduced height wheats [J]. Euphytica,1999,106(2):159-168.

[19] Rebetzke G J, Richards R A. Gibberellic acid-sensitive dwarfing genes reduce plant height to increase kernel number and grain yield of wheat [J]. Australian Journal of Agricultural Research,2000,51(2):235-246.

[20] 张学品,冯伟森,吴少辉,等. 干旱胁迫对不同冬小麦品种水分利用效率及产量性状的影响[J]. 河南农业科学,2012,41(8):21-25,33.



(上接第 326 页)

[15] 谢作轮,赵锐锋,姜朋辉,等. 黄土丘陵沟壑区农村居民点空间重构:以榆中县为例[J]. 地理研究,2014,33 (5):937-947.

[16] 徐保根,赵建强,薛继斌,等. 村级土地规划中的农村居民点用地方式适宜性评价[J]. 中国土地科学,2012,26 (1):27-31.

[17] 孔雪松,刘耀林,邓宣凯,等. 村镇农村居民点用地适宜性评价与整治分区规划[J]. 农业工程学报,2012,28 (18):215-222.

[18] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1-16.

[19] 李平星,樊杰. 区域尺度城镇扩张的情景模拟与生态效应:以广西西江经济带为例[J]. 生态学报,2014, 34 (24):7376-7384.

[20] 齐增湘,廖建军,徐卫华,等. 基于 GIS 的秦岭山区聚落地适宜性评价[J]. 生态学报,2015,35(4):1274-1283.

[21] 周锐,王新军,苏海龙,等. 基于生态安全格局的城市增长边界划定:以平顶山新区为例[J]. 城市规划学刊, 2014(4):57-63.