

# 冀中北小麦品种抗旱性筛选研究

王优信<sup>1</sup>, 延荣<sup>1</sup>, 蔺明月<sup>1</sup>, 符宇<sup>1</sup>, 孟畅<sup>1</sup>, 安浩军<sup>2</sup>, 李晓静<sup>2</sup>, 段会军<sup>1</sup>, 王睿辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学农学院/华北作物种质资源研究与利用教育部重点实验室, 保定 071000; <sup>2</sup>保定市农业科学院, 保定 071000)

**摘要:** 干旱是华北地区小麦生产的重要限制因素, 从推广小麦品种中鉴定和筛选抗旱品种, 对稳定小麦产量、降低区域水分消耗具有重要意义。本研究以近年来在河北省中北部审定、推广的 13 个小麦品种为材料, 设置冬后浇 2 水 (D2 处理)、浇 1 水 (D1 处理) 和不浇水 (D0 处理) 3 种处理方式, 进行了大田条件下的抗旱品种筛选试验。结果表明, 在 D0 处理时, 各供试品种的株高、千粒重、穗粒数、亩穗数等农艺性状以及叶绿素含量、叶片离体失水速率等生理性状均显著下降, 籽粒产量也极显著下降。在 D1 处理时, 各小麦品种的农艺、生理和产量性状也发生不同程度下降。当分别以抗旱指数、加权抗旱指数和抗旱性综合度量值等指标度量品种抗旱性时, 品种之间的抗旱性排序虽有差异, 但仍能看出中麦 1062、河农 825 等品种抗旱性较好。以节水指数对品种进行节水性评价时, 发现河农 130 等 3 个品种节水性较好。在所测定的农艺、生理性状中, 叶绿素含量、小穗数、株高、叶片离体失水速率、旗叶长和穗粒数等与抗旱性存在较程度的相关性, 本研究初步认为叶绿素含量、小穗数可作为抗旱性评价指标。

**关键词:** 小麦; 抗旱鉴定; 抗旱指数; 加权抗旱指数; 抗旱性综合度量值

## Screening for Drought-Resistant Wheat Varieties in Northern Central Area of Hebei Province

WANG You-xin<sup>1</sup>, YAN Rong<sup>1</sup>, LIN Ming-yue<sup>1</sup>, FU Yu<sup>1</sup>, MENG Chang<sup>1</sup>,  
AN Hao-jun<sup>2</sup>, LI Xiao-jing<sup>2</sup>, DUAN Hui-jun<sup>1</sup>, WANG Rui-hui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Agronomy, Hebei Agricultural University/Key Laboratory of Research and Utilization of Crop Germplasm Resources in North China, Ministry of Education, Baoding 071000;

<sup>2</sup>Baoding Academy of Agricultural Sciences, Baoding 071000)

**Abstract:** Drought is one of the major limiting factors that affect the wheat yield production in north China. Identification of drought-resistant accessions from newly released wheat varieties is of great importance, in order to ensure stability of wheat production in this area. The present study attempted to screen drought-resistant varieties from 13 wheat varieties in central and north area of Hebei province under field conditions with different water regimes. If compared to normal watering regime, several agronomical traits including plant height, thousand kernel weight, kernels per spike, spikes per Mu, grain yield, chlorophyll content and leaf water loss rate *in vitro* of wheat decreased significantly with variation under limited water regimes. A slight difference on the resistance level of the varieties was observed using three indexes consisting of drought resistance index (DI), weighed drought resistance index (WDI) and drought-resistance comprehensive evaluation value (D) respectively, while two varieties were qualified showing drought-resistant. Three water-saving varieties have been identified by evaluating with water-saving index. Among the agronomic and physiological traits tested, the

收稿日期: 2020-03-24 修回日期: 2020-07-19 网络出版日期: 2020-09-02

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200324001>

第一作者研究方向为小麦抗旱种质筛选研究, E-mail: wangyouxin123@sina.cn

通信作者: 王睿辉, 研究方向为小麦种质资源研究, E-mail: wangrh@hebau.edu.cn

段会军, 研究方向为玉米遗传育种研究, E-mail: hjuan@hebau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发项目 (2017YFD0300901)

Foundation project: National Key Research & Development Project (2017YFD0300901)

chlorophyll content, spikelet per spike, plant height, water loss rate of cutting leaves, flag leaf length and kernels per spike were found to be associated with drought resistance, and the chlorophyll content and spikelet per spike might serve as indicators simplifying the drought evaluation process.

**Key words:** bread wheat (*Triticum aestivum* L.); drought resistance evaluation; drought-resistant index; weighed drought-resistant index; drought resistance comprehensive evaluation values

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是全球近 40% 人口的主粮作物<sup>[1]</sup>。到 2050 年,世界人口将增加到 97 亿,按当前的粮食生产水平将有 5500 万至 1.23 亿人的口粮无法保障。这就要求粮食生产需在现有水平上增加 70% 以上 (<http://www.fao.org/home/zh/>)。除人口增长对小麦生产带来的压力外,资源性约束也严重影响到小麦生产。随着全球气候变暖加剧,干旱频发已成为制约小麦生产的重要限制因子<sup>[2]</sup>。全球 50% 的小麦种植区受到水分不足甚至是干旱的影响,所导致的减产可达 10%~70%<sup>[3-4]</sup>。小麦也是我国居民的主要口粮作物,年产量约 1300 亿 kg。我国 70% 左右的小麦种植区受到不同程度的干旱影响,每年因干旱缺水导致的小麦减产大致在 100 亿 kg<sup>[5]</sup>。虽然当前粮食能够自给有余,但我国小麦的供给压力仍然较大<sup>[6]</sup>。

河北省是我国重要的小麦种植区域,也是水资源最为匮乏的省份之一,1978-2015 年年均受干旱影响面积高达 162.7 万  $\text{hm}^2$  (国家统计局 <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>)。由于自然降水不足,小麦生产严重依赖地下水灌溉,进而导致深层地下水开采过度,地下水位自 1972 年开始以平均 1~2 m/年的速度下降<sup>[7]</sup>,在冀北低平原区形成了大面积的漏斗区域(2015 年河北省地质环境状况公报)。这对在冀中北地区筛选和推广抗旱性突出、水资源利用效率高的小麦品种提出了迫切要求。

小麦抗旱性是受多基因控制的复杂性状,遗传机制复杂、影响因素众多<sup>[5]</sup>,准确评价的难度较大。不同性状在不同环境条件下对水分胁迫的反应也不同,而且相互之间存在直接或者间接的相关性<sup>[7]</sup>。因此抗旱性评价方法也从以前的抗旱系数<sup>[8]</sup>、抗旱指数<sup>[9]</sup>、敏感指数<sup>[10]</sup>等单一评价方式到利用隶属函数<sup>[11]</sup>、主成分分析<sup>[12]</sup>、灰色关联度分析<sup>[13]</sup>和综合度量值<sup>[14]</sup>等综合评价鉴定方法的转变。但在不同作物、不同时期用哪种评价方法还没有一个准确的定论,而且国内很多研究是在温室盆栽或小面积的大田小区进行筛选,在贴近大田生产条件下进行的鉴定试验还较少。

作物的株高、叶片失水速率、叶片水势和叶绿素

含量等性状对水分亏缺极为敏感,被认为与小麦的抗旱性有关<sup>[15-17]</sup>。张荣芝等<sup>[15-16]</sup>的研究表明,旱地小麦的株高、千粒重、穗茎节长、抽穗度和穗粒重具有较高的广义遗传率和狭义遗传率,可作为小麦抗旱性鉴定的农艺或形态指标。干旱胁迫下小麦的叶片尤其是旗叶受影响较大,表现为叶片叶绿素含量、叶绿素荧光下降,叶片失水速率加剧等<sup>[17-19]</sup>。

鉴于此,本研究以河北省中北部近年审定、推广的 13 个小麦品种为材料,通过模拟大田条件下的水分胁迫试验,考察供试小麦品种在干旱胁迫下的农艺和生理性状变化,筛选抗旱节水品种和抗旱鉴定指标,为抗旱小麦品种的培育和筛选提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料包括近年来在河北省中北部水地(优质)组审定、推广面积较大的 13 个小麦品种,分别是沧麦 119、河农 825、河农 6049、河农 6425、京冬 18、中麦 175、石新 828、中麦 1062、轮选 169、中麦 816、京花 11、小偃 60 和河农 130。

### 1.2 试验方法

试验于 2017-2018 年小麦生产季在保定市农业科学院徐水试验基地进行。每个供试小麦品种种植面积为 495  $\text{m}^2$ ,设置冬后浇 2 水(丰水, D2)、浇 1 水(节水, D1)和浇 0 水(干旱, D0)共 3 个处理,每处理设 3 次重复,每个品种共种植 9 个试验小区(3 个处理  $\times$  3 次重复),单个小区面积约 55  $\text{m}^2$ 。小区间设置 3 m 的隔离区。D0 处理为雨养条件,冬后至小麦收获前不进行任何人工灌溉;D1 为冬后(拔节期)浇 1 次水,灌溉量为 675  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;D2 为冬后浇 2 次水,分别于拔节期、开花期进行,每次灌水量均为 675  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。2017-2018 年徐水试验站小麦生产季的自然降水量为 209.9 mm。于 2017 年 10 月 7 日播种,行距 15 cm,播种前施复合肥(N:P:K=17:17:17)750  $\text{kg}/\text{hm}^2$  作基肥。基本苗均约为 375 万  $/\text{hm}^2$ 。在 D1、D2 处理时,均在小麦拔节期追施尿素 300  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。常规田间管理,于 2018 年 6 月 15 日收获。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 田间调查与考种** 小麦收获前,调查各供试品种在不同水处理下的单位面积穗数。按1 m 双行法,在每个处理、每个重复随机选择2个有代表性的样点(0.30 m<sup>2</sup>),计数样点内的有效穗数,然后换算出亩穗数。参照金善宝<sup>[20]</sup>的方法进行考种。在小麦收获前,每品种、每处理、每重复选取10个有代表性的单株,分别对株高、抽穗度(旗叶叶耳至穗基部的茎秆长度)、穗下节间长度、旗叶长、穗长、小穗数、穗粒数和千粒重进行调查。对每个品种、每处理小区实收2 m<sup>2</sup>测产,脱粒后计算产量(折合籽粒含水量为13%)。

**1.3.2 旗叶叶片离体失水速率测定** 参考张娟等<sup>[21]</sup>的方法测定挑旗期小麦旗叶的叶片离体失水速率。每个小麦品种、每处理、每重复随机取6片叶子,立即置于自封袋中、封口,在温度、湿度相对稳定的室内称取鲜重(W1)后,迅速将叶片放在干纱布上,保持失水状态,6 h后再次称重(W2),按以下公式计算叶片离体失水速率(g/h):叶片离体失水速率(g/h)=(W1-W2)/6。

**1.3.3 叶片相对含水量测定** 参照邹琦<sup>[22]</sup>的方法测定挑旗期小麦旗叶的相对含水量。每个小麦品种、每处理、每重复取6片旗叶,称鲜重(FW)后迅速将叶片剪尖端朝下插入装有清水的试管中,封口,于4℃下放置24 h后,取出叶片,将叶片表面水分吸干后称重(SW)。然后,将叶片置105℃烘箱中,杀青30 min,于75℃下将叶片烘至恒重,称重(DW)。按以下公式计算叶片相对含水量:叶片相对含水量(%)=(FW-DW)/(SW-DW)×100%。

**1.3.4 叶绿素含量测定** 参照《生理育种II:小麦田间表型鉴定指南》<sup>[23]</sup>的方法,使用手持叶绿素仪SPAD502(Minolta,日本)在挑旗期测定小麦旗叶的叶绿素含量。每个品种、每处理、每重复随机选择5片清洁、完好无病害的旗叶。用探头测定叶片中部。每个叶片测量3次。

### 1.4 抗旱指标的计算

用Microsoft Excel 2010对数据进行整理,用SPSS 19进行系统聚类分析、灰色关联度分析和通路分析。参照兰巨生等<sup>[9]</sup>的方法以干旱胁迫和正常灌水的产量为依据计算抗旱系数(DC)和抗旱指数(DI),参照孙明清等<sup>[24]</sup>的方法计算节水指数(WSI),本研究以中麦175为对照品种。参照国家标准《小麦抗旱性鉴定评价技术规范》(GB/T21127-

2007)<sup>[25]</sup>,依据节水指数,可将供试小麦品种划分为极强(WSI≥1.2)、强(1.00≤WSI≤1.19)、中等(0.80≤WSI≤0.99)、弱(0.60≤WSI≤0.79)、极弱(WSI≤0.59)共5个等级<sup>[24]</sup>。

参照文献[10,26-27]的方法,计算隶属函数 $\mu(x)$ 和关联度 $r_i$ 。最后计算每个品种的抗旱性综合度量值(D)和加权抗旱指数(WDI)。

系统聚类法即先将每个样品分为一类,然后把最靠近的样品(即距离最小)首先聚为小类,再将已聚合的小类按其类间距离再合并,不断继续下去,最后把一切子类都聚合为一个大类。本研究采用SPSS 19软件,设置聚类方法为组间联接,以平方欧式距离 $\lambda$ 为度量标准,对抗旱指数(DI)、抗旱性综合度量值(D)和加权抗旱指数(WDI)进行了系统聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水处理对小麦农艺、生理性状和产量的影响

**2.1.1 不同水处理对小麦农艺性状和产量的影响** 调查了不同水处理下各供试小麦品种农艺性状和产量等数据(表1)。可以看出,在受到水分胁迫(D1、D0)时,各品种的农艺和产量性状均发生了不同程度的下降:各供试小麦品种在D1、D0处理下的产量均极显著低于D2处理,株高和穗粒数在D1、D2间无显著差异,但显著高于D0处理;亩穗数和千粒重在D1、D2间无显著差异,但极显著高于D0处理;穗下节间长度、抽穗度、穗长、小穗数在D0、D1和D2处理间差异不显著。

**2.1.2 不同水处理下各供试小麦品种的生理性状变化** 调查了在不同水处理下各供试小麦品种的叶绿素含量、叶片相对含水量和叶片离体失水速率变化。由于是在小麦挑旗期测定这些性状,故只有D0与D1处理下的数据(表2)。可以看出,在受到干旱胁迫时,各品种的叶绿素含量和叶片离体失水速率极显著低于D1处理( $P<0.01$ )。在D0处理中,叶绿素含量平均为47.69,最高值为56.25(轮选169),最低值为41.76(京冬18);叶片离体失水速率平均为0.01 g/h,最高值为0.024 g/h(河农130),最低值为0.006 g/h(中麦816)。与D1处理相比,中麦175在D0处理时叶绿素含量降幅最大(为16.8%),轮选169的降幅最小(为1.9%);中麦816的叶片离体失水速率降幅最大(为77.4%),河农825的降幅最小(为10.0%)。

表 1 不同水分处理下供试小麦品种的农艺性状和产量性状

Table 1 Agronomic and yield-related traits of wheat varieties treated with different water treatments

性状 Traits	D0		D1		D2	
	平均值 ± 标准差	变异系数 (%)	平均值 ± 标准差	变异系数 (%)	平均值 ± 标准差	变异系数 (%)
	Mean ± SD	CV	Mean ± SD	CV	Mean ± SD	CV
株高 (cm) PH	73.2 ± 4.47b	6.11	77.73 ± 4.59a	5.91	77.66 ± 4.79a	6.16
抽穗度 (cm) HD	9.99 ± 2.08a	20.86	11.09 ± 3.17a	28.57	11.17 ± 2.93a	26.22
穗下节间长度 (cm) PL	24.74 ± 2.85a	11.50	27.08 ± 3.12a	11.50	27.16 ± 3.20a	11.80
穗长 (cm) SL	7.36 ± 0.89a	12.13	7.38 ± 1.02a	13.84	7.52 ± 0.93a	12.38
小穗数 SNPS	17.16 ± 1.14a	6.64	16.92 ± 0.97a	5.74	17.33 ± 1.15a	6.61
亩穗数 (万) SNPM	41.58 ± 2.55B	6.10	44.71 ± 2.16A	4.82	45.28 ± 2.33A	5.09
穗粒数 KPS	28.47 ± 1.33b	4.68	29.71 ± 1.39a	4.69	30.57 ± 1.69a	5.54
千粒重 (g) TKW	35.43 ± 1.72B	4.84	37.39 ± 2.00A	5.36	38.36 ± 1.97A	5.13
产量 (kg) Y	437.95 ± 52.00C	11.87	512.69 ± 45.35B	8.85	579.62 ± 39.88A	6.88

大、小写字母分别代表差异极显著 ( $P < 0.01$ )、显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

Capital letters and letters in lower case represent extremely significant difference ( $P < 0.01$ ) and significant difference ( $P < 0.05$ ), respectively. PH: Plant height, HD: Heading degree, PL: Peduncle length, SL: Spike length, SNPS: Spikelet number per spike, SNPM: Spike numbers per Mu, KSP: Kernels per spike, TKW: Thousand kernel weight, Y: Yield, the same as below

表 2 不同水分处理下供试小麦品种的生理性状

Table 2 Physiological characters of wheat varieties tested under different water treatments

生理性状 Physiological characters	D0		D1	
	平均值 ± 标准差	变异系数 (%)	平均值 ± 标准差	变异系数 (%)
	Mean ± SD	CV	Mean ± SD	CV
叶绿素含量 CC	47.69 ± 4.30B	9.01	52.34 ± 3.32A	6.34
叶片离体失水速率 (g/h) WLR	0.01 ± 0.10B	40.79	0.03 ± 0.01A	37.21
叶片相对含水量 (%) LRW	89.00 ± 0.05A	5.71	92.00 ± 0.04A	3.98

CC: Chlorophyll content, WLR: Water loss rate of cutting leaves, LRW: Leaf relative water content, the same as below

## 2.2 供试小麦品种的抗旱性评价

### 2.2.1 基于抗旱指数 (DI) 的小麦品种抗旱性评价

计算了各供试小麦品种的抗旱指数 (表 3)。各品种 DI 值变化在 0.52~1.07 之间, 平均为 0.77, 以品种中

麦 1062 的 DI 值最高 (1.07)。通过系统聚类, 13 份小麦品种的抗旱性在  $\lambda=1.5$  处可划分为强抗、抗、中抗、较敏感、敏感 5 级, 其中, 中麦 1062 和轮选 169 为强抗旱品种, 河农 825 和河农 6049 为抗旱品种。

表 3 供试小麦品种的抗旱指数

Table 3 Drought index of wheat varieties tested

品种 Varieties	抗旱指数 DI	排序 Ranking	抗旱等级 Drought resistance level	D0 产量 (kg) Yield under D0	D2 产量 (kg) Yield under D2
中麦 1062 Zhongmai1062	1.07	1	强抗	538.34	620.00
轮选 169 Lunxuan169	1.03	2	强抗	498.34	551.67
河农 825 Henong825	0.91	3	抗	465.00	545.00
河农 6049 Henong6049	0.87	4	抗	450.00	531.67
河农 6425 Henong6425	0.84	5	中抗	480.00	625.00
石新 828 Shixin828	0.82	6	中抗	463.34	596.67
中麦 175 Zhongmai175	0.77	7	中抗	430.00	550.00

表 3(续)

品种 Varieties	抗旱指数 DI	排序 Ranking	抗旱等级 Drought resistance level	D0 产量 (kg) Yield under D0	D2 产量 (kg) Yield under D2
河农 130 Henong130	0.70	8	较敏感	423.34	588.34
中麦 816 Zhongmai816	0.66	9	较敏感	433.34	646.67
京花 11 Jinghua11	0.63	10	较敏感	391.67	553.34
京冬 18 Jingdong18	0.57	11	敏感	390.00	605.00
沧麦 119 Cangmai119	0.57	12	敏感	360.00	520.00
小偃 60 Xiaoyan60	0.52	13	敏感	370.00	601.67

**2.2.2 基于抗旱性综合度量值(D 值)的小麦品种抗旱性评价** 依照灰色关联度理论,构成灰色系统各性状组成的比较数列(即所调查各性状的抗旱指数)和参考数列(即各供试品种的产量抗旱指数)之间的关联度越大,说明比较数列和参考数列之间的变化趋势越接近,相互关系越紧密<sup>[28]</sup>。因此,计算了各性状与抗旱指数间的关联

度(表 4)。可以看出,与产量抗旱指数密切程度较大的前 5 个性状依次是亩穗数(0.73)、穗下节间长度(0.73)、相对含水量(0.70)、旗叶长(0.68)、抽穗度(0.65)。因此选择与产量抗旱指数的关联度均大于 0.7 的 3 个性状(亩穗数、穗下节间长度、相对含水量)作为计算抗旱性综合度量值(D 值)的参考指标。

表 4 各性状与抗旱指数间的关联度

Table 4 Correlation between each character and drought index

性状 Characters	亩穗数 SNPM	穗下节间 长度 PL	相对 含水量 LRW	旗叶长 LOFL	抽穗度 HD	穗粒数 KPS	千粒重 TKW	穗长 SL	小穗数 SNPS	叶绿素 含量 CC	叶片离体 失水速率 WLR	株高 PH
关联度 $r_i$	0.73	0.73	0.70	0.68	0.65	0.65	0.64	0.61	0.61	0.60	0.59	0.59

LOFL: Length of flag leaf, the same as below

以亩穗数、穗下节间长度和相对含水量等 3 个参考指标,计算各品种的 D 值(表 5),并利用系统聚类分析在  $\lambda=2$  处将供试 13 个小麦品种材料的抗

旱性划分为强抗、抗、中抗、较敏感、敏感 5 个等级,其中中麦 1062 和河农 825 为强抗旱品种,中麦 175 和石新 828 为抗旱品种。

表 5 供试小麦品种的抗旱性综合度量值、加权抗旱指数及抗旱等级

Table 5 D value and WDI values and corresponding scales for wheat varieties tested

品种 Varieties	抗旱性 综合度量值 D	排序 Ranking	抗旱等级 Drought resistance level	加权抗旱指数 WDI	排序 Ranking	抗旱等级 Drought resistance level
中麦 1062 Zhongmai1062	0.88	1	强抗	1.02	1	高抗
河农 825 Henong825	0.82	2	强抗	0.99	2	高抗
中麦 175 Zhongmai175	0.72	3	抗	0.97	3	中抗
石新 828 Shixin828	0.65	4	抗	0.92	7	中抗
小偃 60 Xiaoyan60	0.59	5	中抗	0.95	5	中抗
河农 6425 Henong6425	0.56	6	中抗	0.95	6	中抗
轮选 169 Lunxuan169	0.54	7	中抗	0.92	8	中抗
河农 6049 Henong6049	0.53	8	中抗	0.88	9	较敏感
河农 130 Henong130	0.39	9	较敏感	0.67	13	敏感
沧麦 119 Cangmai119	0.32	10	较敏感	0.96	4	中抗
京花 11 Jinghua11	0.24	11	敏感	0.85	12	较敏感
京冬 18 Jingdong18	0.23	12	敏感	0.86	10	较敏感
中麦 816 Zhongmai816	0.21	13	敏感	0.85	11	较敏感

**2.2.3 基于加权抗旱指数值(WDI)对小麦品种抗旱性评价** 计算了各供试品种的加权抗旱指数(WDI)(表5),并利用系统聚类分析在 $\lambda=1.5$ 处将13个供试小麦品种的抗旱性划分为高抗、中抗、较敏感、敏感4个等级,其中高抗旱品种为中麦1062和河农825,抗及中抗旱品种为中麦175、沧麦119、

小偃60、河农6425、石新828和轮选169。

### 2.3 各供试小麦品种的节水性评价

进一步计算各品种的节水指数(表6)。参照文献[25],各参试小麦品种的节水性被划分为5个等级。其中,河农130的节水性最好,其次为中麦1062和中麦175。

表6 供试小麦品种的节水指数

Table 6 Water saving index of wheat varieties

品种 Varieties	节水指数 WSI	节水等级 Water saving level	产量(kg) Yield	
			D1	D2
河农130 Henong130	1.21	极强	598.34	588.34
中麦1062 Zhongmai1062	1.17	强	601.67	620.00
中麦175 Zhongmai175	1.00	强	525.00	550.00
京花11 Jinghua11	0.96	中等	516.67	553.34
河农825 Henong825	0.96	中等	511.67	545.00
沧麦119 Cangmai119	0.95	中等	496.67	520.00
轮选169 Lunxuan169	0.93	中等	506.67	551.67
河农6425 Henong6425	0.91	中等	535.00	625.00
京冬18 Jingdong18	0.82	中等	498.34	605.00
小偃60 Xiaoyan60	0.77	弱	481.67	601.67
河农6049 Henong6049	0.76	弱	450.00	531.67
石新828 Shixin828	0.75	弱	473.34	596.67
中麦816 Zhongmai816	0.68	弱	470.00	646.67

### 2.4 相关性分析

为寻找与抗旱性紧密相关的农艺或生理性状,比较了各性状与抗旱指数(DI)和抗旱性综合度量值(D)间的相关性(表7)。结果表明,DI值与叶绿素含量、株高呈极显著相关,与旗叶

叶片离体失水速率、穗下节间长度、小穗数和旗叶长度等性状呈显著相关;D值与穗下节间长度、亩穗数、抗旱指数和叶片相对含水量呈极显著相关,与叶片离体失水速率和叶绿素含量显著相关(表7)。

表7 供试品种性状之间及其与抗旱指数、抗旱性综合度量值之间的相关性

Table 7 Correlations between characters and their correlations to DI and D values

指标 Index	叶绿素 含量 CC	叶片离体 失水速率 WLR	穗下节间 长度 PL	株高 PH	旗叶长 LOFL	小穗数 SNPS	相对 含水量 LRW	亩穗数 SNPM	抗旱性 综合度 量值 D value	抗旱 指数 DI
穗粒数 KPS	0.13	0.12	0.28	0.35	0.18	0.47	0.39	0.17	0.37	0.49
抗旱指数 DI	0.78**	0.65*	0.62*	0.77**	0.56*	0.61*	0.43	0.49	0.69**	
抗旱性综合度量值 D value	0.56*	0.62*	0.79**	0.39	0.52	0.42	0.77**	0.70**		
亩穗数 SNPM	0.25	0.45	0.31	0.10	0.33	0.44	0.35			
相对含水量 LRW	0.49	0.49	0.44	0.33	0.27	-0.03				
小穗数 SNPS	0.25	0.57	0.42	0.47	0.547					
旗叶长 LOFL	0.56*	0.79**	0.62*	0.55						
株高 PH	0.77**	0.73**	0.40							
穗下节间长度 PL	0.42	0.48								
叶片离体失水速率 WLR	0.70*									

\*和\*\*分别表示不同水处理条件下各性状在0.05和0.01水平上差异显著

\* and \*\* indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level under different water treatment

## 2.5 通径分析

为进一步明确各性状间的相互作用及其对抗旱指数和抗旱性综合度量值效应的大小,分别以抗旱指数和抗旱性综合度量值为因变量(Y),以千粒重(X1)、叶绿素含量(X2)、叶片相对含水量(X3)、叶片离体失水速率(X4)、穗下节间长度(X5)、株高(X6)、穗长(X7)、小穗数(X8)、抽穗度(X9)、旗叶长(X10)、亩穗数(X11)、穗粒数(X12)为自变量,进行了通径分析。计算出自变量与抗旱指数间的最优方程: $Y = -4.69 + 2.62X_2 + 4.33X_8 - 1.62X_7 + 0.37X_9$ 。其中叶绿素含量、小穗数、穗长和抽穗度4个性状入选,叶绿素含量和小穗数对抗旱指数的直接作用较大(直接通径系数分别为0.84、0.73)。

各个自变量与抗旱性综合度量值间的最优方程为 $Y = -7.29 + 3.67X_5 + 3.49X_{11} + 1.31X_3 - 2.07X_{10} - 6.00X_6$ 。其中穗下节间长度、亩穗数、叶片相对含水量和株高4个性状入选,穗下节间长度、亩穗数、叶片相对含水量对抗旱性综合度量值的直接作用较大(直接通径系数分别为0.45、0.45、0.41)。

## 3 讨论

### 3.1 作物在受到水分胁迫时农艺、生理性状的主要变化

作物在受到水分胁迫时,株高<sup>[29]</sup>、小穗数<sup>[30]</sup>、叶绿素含量<sup>[31]</sup>和产量<sup>[30]</sup>等均受到明显影响,表现出株高、单株穗数、总小穗数、穗粒数、千粒重和单株产量显著降低,不育小穗数增多<sup>[30]</sup>;叶面积、干物质积累量<sup>[29]</sup>、叶绿素含量<sup>[32-34]</sup>、叶片相对含水量<sup>[33,35]</sup>、叶片离体失水速率<sup>[33]</sup>等性状也有不同程度下降。本研究中,各供试小麦品种在受到重度水分胁迫(D0处理)时,其株高、千粒重、穗粒数、亩穗数、叶绿素含量、叶片离体失水速率和籽粒产量等性状均显著下降;在受到轻度胁迫(D1处理)时,供试品种除籽粒产量外的其他性状均与对照(D2处理)无显著差异。这一结果与许海霞等<sup>[30]</sup>、白志英等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。

### 3.2 作物抗旱性评价方法与抗旱指标体系

作物抗旱性是较难准确评价的复杂性状<sup>[5]</sup>。有多种方法被用来评价作物的抗旱性,其中以抗旱系数、抗旱指数和抗旱性综合度量值较为常用。抗旱系数重点考虑处理组和对照组的绝对产量,突出了品种的绝对抗旱性,但忽视了品种的产量水平<sup>[7]</sup>;抗旱指数突出体现作物在旱地下的产量水平,增加了对抗旱性筛选的分辨率<sup>[9]</sup>;抗旱性综合

度量值则通盘考虑了干旱胁迫下所调查各性状间的相互关系和重要性<sup>[36]</sup>,但也面临着因个别性状而导致整体D值下降或上升的风险。本研究中,当用DI、WDI、D值分别对供试品种的抗旱性进行评价时,各供试品种的抗旱性分级并不完全一致,类似现象在前人的研究中亦出现过<sup>[10,14,36]</sup>,这也进一步说明小麦品种的抗旱性是复杂的,干旱处理方法、试验规模、试验年型甚至土壤类型均可能对鉴定结果产生显著影响<sup>[5,24]</sup>。尽管如此,本研究中中麦1062和河农825在3种评价方法中均表现为抗旱,这在冀中北地区推广抗旱品种和进一步通过遗传学方法解析小麦抗旱性的遗传基础奠定了材料学基础。

作物抗旱性是受多基因控制的复杂性状,用哪个或哪些指标来衡量和评价其抗旱性,较难确定。早期研究较多的采用了农艺性状来评价作物的抗旱性<sup>[30,13,37]</sup>。后来,人们观察到作物的生理性状也与植物的抗旱性密切相关<sup>[38]</sup>,如叶片含水量、叶绿素含量和离体叶片失水速率<sup>[32,35,39-40]</sup>等。本研究中,株高、旗叶长、小穗数、叶绿素含量、叶片离体失水速率和穗下节间长度等性状与抗旱指数和/或抗旱性综合度量值均呈显著相关,叶绿素含量和小穗数还对抗旱指数直接作用较大(直接通径系数分别为0.84、0.73)。故本研究初步认为小穗数和叶绿素含量可作为抗旱性评价指标,即抗旱性好的品种,其小穗数和叶绿素含量在干旱条件下降低幅度较小。

## 参考文献

- [1] 何中虎,庄巧生,程顺和,于振文,赵振东,刘旭. 中国小麦产业发展与科技进步. 农学学报, 2018, 8(1): 99-106  
He Z H, Zhuang Q S, Cheng S H, Yu Z W, Zhao Z D, Liu X. Wheat production and technology improvement in China. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 99-106
- [2] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一). 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895  
Zhao G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I). Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(5): 886-895
- [3] Piao S L, Ciais P, Huang Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467: 43-51
- [4] Curtis T, Halford N G. Food security: the challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. Annals of Applied Biology, 2014, 164: 354-372
- [5] 陈晓杰. 中国冬小麦抗旱指标评价、种质筛选及重要性状与SSR标记的关联分析. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013  
Chen X J. Evaluation of drought tolerance index selection of drought tolerant varieties and association analysis of important traits with SSR markers in Chinese winter bread wheat. Yangling: Northwest A&F University, 2013
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴—2018. 北京: 中国统计出版社,

- 2018: 408-409  
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook—2018. Beijing: China Statistics Press, 2018: 408-409
- [ 7 ] 张龙龙, 杨明明, 董剑, 赵万春, 高翔, 陈冬阳. 三个小麦新品种不同生育阶段抗旱性的综合评价. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 426-434  
Zhang L L, Yang M M, Dong J, Zhao W C, Gao X, Chen D Y. Comprehensive analysis of drought resistance of three new wheat cultivars at different growth stages. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(4): 426-434
- [ 8 ] Blum A, Jordan W R. Breeding crop varieties for stress environments. Critical Reviews in Plant Sciences, 1985, 2: 199-238
- [ 9 ] 兰巨生, 胡福顺, 张景瑞. 作物抗旱指数的概念和统计方法. 华北农学报, 1990, 5(2): 20-25  
Lan J S, Hu F S, Zhang J R. The concept and statistical method of drought resistance index in crops. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1990, 5(2): 20-25
- [ 10 ] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674  
Qi X S, Liu Z X, Guan R X, Wang X R, Gou Z W, Chang R Z, Qiu L J. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 665-674
- [ 11 ] 李海明, 刘绍东, 张思平, 李阳, 陈静, 马慧娟, 沈倩, 赵新华, 李存东, 庞朝友. 陆地棉种质资源花铃期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 583-597  
Li H M, Liu S D, Zhang S P, Li Y, Chen J, Ma H J, Shen Q, Zhao X H, Li C D, Pang C Y. Identification and indices screening of drought tolerance at flowering and boll setting stage in upland cotton germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 583-597
- [ 12 ] 张军, 鲁敏, 孙树贵, 庞玉辉, 敬樊, 陈新宏. 7个冬小麦品种灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价. 植物科学学报, 2014, 32(2): 148-157  
Zhang J, Lu M, Sun S G, Pang Y H, Jing F, Chen X H. Screening indexes for drought resistance of seven winter wheat cultivars at the grain-filling stage. Plant Science Journal, 2014, 32(2): 148-157
- [ 13 ] 王士强, 胡银岗, 余奎军, 周琳璘, 孟凡磊. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2452-2459  
Wang S Q, Hu Y G, She K J, Zhou L L, Meng F L. Gray relational grade analysis of agronomical and physi-biochemical traits related to drought tolerance in wheat. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2452-2459
- [ 14 ] 李龙, 毛新国, 王景一, 昌小平, 柳玉平, 景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价. 作物学报, 2018, 44(7): 988-999  
Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(7): 988-999
- [ 15 ] 张荣芝, 刘桂茹, 卢建祥, 谷俊涛. 小麦抗逆育种几个抗旱性状及主要农艺性状的遗传研究. 河北农业大学学报, 1996, 19(4): 6-11  
Zhang R Z, Liu G R, Lu J X, Gu J T. The hereditary study of some drought-resistance characters and major agronomic characters of winter wheat growing on dry land. Journal of Agricultural University of Hebei, 1996, 19(4): 6-11
- [ 16 ] 张荣芝, 卢建祥. 旱地冬小麦抗旱性的形态特征及生理特性的初步研究. 河北农业大学学报, 1991, 14(2): 10-14  
Zhang R Z, Lu J X. A preliminary study on the morphological and physiological characteristics of drought resistance of winter wheat. Journal of Agricultural University of Hebei, 1991, 14(2): 10-14
- [ 17 ] 赵红梅, 郭程瑾, 段巍巍, 齐永清, 王笑颖, 李雁鸣, 肖凯. 小麦品种抗旱性评价指标研究. 植物遗传资源学报, 2007, 8(1): 76-81  
Zhao H M, Guo C J, Duan W W, Qi Y Q, Wang X Y, Li Y M, Xiao K. Studies on evaluation indices for drought resistance capacity in wheat varieties. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(1): 76-81
- [ 18 ] Schonfeld M A, Johnson R C, Carver B F, Mornhinweg D W. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. Crop Science, 1988, 28(3): 526-531
- [ 19 ] 闫金龙, 张俊灵, 张东旭, 冯丽云, 张树彬. 不同水分下小麦生理性状与产量及抗旱节水性. 分子植物育种, 2019, 17(17): 5775-5782  
Yan J L, Zhang J L, Zhang D X, Feng L Y, Zhang S B. Yield, drought resistance and water saving with physiological traits under different water regimes in wheat. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(17): 5775-5782
- [ 20 ] 金善宝. 中国小麦品种志. 北京: 中国农业出版社, 1997: 1-4  
Jin S B. Annals of Chinese wheat. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 1-4
- [ 21 ] 张娟, 张正斌, 谢惠民, 董宝娣, 胡梦芸, 徐萍. 小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究. 作物学报, 2005, 31(12): 1593-1599  
Zhang J, Zhang Z B, Xie H M, Dong B D, Hu M Y, Xu P. The relationship between water use efficiency and related physiological traits in wheat leaves. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(12): 1593-1599
- [ 22 ] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 5-10  
Zou Q. Experimental guidance of plant physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 5-10
- [ 23 ] Pask A, Pietragalla J, Mullan D, Reynolds M. 生理育种 II: 小麦田间表型鉴定指南. 景蕊莲, 曹新有, 任勇, 王德梅, 肖永贵, 朱展望, 译. 北京: 科学出版社, 2017: 11-17  
Pask A, Pietragalla J, Mullan D, Reynolds M. Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping. Translated by Jing R L, Cao X Y, Ren Y, Wang D M, Xiao Y G, Zhu Z W. Beijing: Science Press, 2017: 11-17
- [ 24 ] 孙明清, 刘强, 宋小颖, 高倩, 张辉, 刘鑫翠, 张广辉, 安庆学, 张立波. 冀中南节水型冬小麦品种筛选. 河北农业科学, 2019, 23(4): 29-33  
Sun M Q, Liu Q, Song X Y, Gao Q, Zhang H, Liu X C, Zhang G H, An Q X, Zhang L B. Screening of water-saving winter wheat varieties in the central and south of Hebei Province. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2019, 23(4): 29-33
- [ 25 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准 GB/T21127-2007, 小麦抗旱性鉴定评价技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2007: 10



- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National standard of the People's Republic of China GB/T21127-2007, Technical specification for identification and evaluation of drought resistance of wheat. Beijing: China Standards Press, 2007: 10
- [26] 李龙, 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 王述民. 普通菜豆品种苗期抗旱性鉴定. 作物学报, 2015, 41(6): 963-971  
Li L, Wang L F, Wu J, Jing R L, Wang S M. Identification of drought resistance at seedlings stage in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(6): 963-971
- [27] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2872-2887  
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of job's tears (*Coxi lacryma-jobi* L.) germplasm resources at seedling stage. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(15): 2872-2887
- [28] 尹利, 逯晓萍, 傅晓峰, 李美娜, 郭建. 高丹草杂交种灰色关联分析与评判. 中国草地学报, 2006, 28(3): 21-25, 43  
Yin L, Lu X P, Fu X F, Li M N, Guo J. The grey relation analysis and evaluation of hybrid pacesetter. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(3): 21-25, 43
- [29] 杨贝贝, 赵丹丹, 任永哲, 辛泽毓, 王志强, 林同保. 不同小麦品种对干旱胁迫的形态生理响应及抗旱性分析. 河南农业大学学报, 2017, 51(2): 131-139  
Yang B B, Zhao D D, Ren Y Z, Xin Z Y, Wang Z Q, Lin T B. Drought resistance of different wheat cultivars and physiological response to drought stress. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(2): 131-139
- [30] 许海霞, 李伟, 程水永, 董中东, 李阳, 崔党群. 干旱胁迫对小麦农艺性状的影响. 中国农学通报, 2008, 24(3): 125-129  
Xu H X, Li W, Cheng X Y, Dong Z D, Li Y, Cui D Q. Drought stress effect on agronomic traits of wheat. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(3): 125-129
- [31] 毛浩田, 陈梦莹, 吴楠, 刘海悦, 刘玉林, 张怀渝, 陈洋尔. 干旱胁迫对不同倍性小麦和八倍体小黑麦苗期光合能力与抗氧化系统的影响. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1246-1254  
Mao H T, Chen M Y, Wu N, Liu H Y, Liu Y L, Zhang H Y, Chen Y E. Effects of drought stress on photosynthetic capacity and antioxidant system in wheat with different ploidy levels and octoploid triticale at seedling stage. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(10): 1246-1254
- [32] 董建力, 许兴, 李树华, 朱林, 景蕊莲. 不同春小麦品种碳同位素分辨率和叶绿素含量的差异及其与抗旱性的关系. 麦类作物学报, 2011, 31(1): 88-91  
Dong J L, Xu X, Li S H, Zhu L, Jing R L. Variation of carbon isotope discrimination and chlorophyll content among different cultivars of spring wheat and their relatedness to drought resistance. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(1): 88-91
- [33] 侯鹏飞, 马俊青, 赵鹏飞, 张欢玲, 赵会杰, 刘华山, 赵一丹, 汪月霞. 外源甜菜碱对干旱胁迫下小麦幼苗叶绿体抗氧化酶及 *psbA* 基因表达的调节. 作物学报, 2013, 39(7): 1319-1324  
Hou P F, Ma J Q, Zhao P F, Zhang H L, Zhao H J, Liu H S, Zhao Y D, Wang Y X. Effects of betaine on chloroplast protective enzymes and *psbA* gene expression in wheat seedlings under drought stress. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(7): 1319-1324
- [34] 白志英, 李存东, 孙红春, 吴同燕. 干旱胁迫对小麦叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体调控. 华北农学报, 2009, 24(1): 1-6  
Bai Z Y, Li C D, Sun H C, Wu T Y. The effect and chromosomal control on chlorophyll content and corticoid content under drought stress in wheat. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(1): 1-6
- [35] 崔俊美, 张朝明, 张怀渝, 陈洋尔. 7个小麦品种的抗旱性比较. 麦类作物学报, 2015, 35(11): 1542-1550  
Cui J M, Zhang C M, Zhang H Y, Chen Y E. Comparison of drought resistance of different wheat varieties. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(11): 1542-1550
- [36] 武仙山, 昌小平, 景蕊莲. 小麦灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价. 麦类作物学报, 2008, 28(4): 626-632  
Wu X S, Chang X P, Jing R L. Screening indexes for drought resistance of wheat at grain-filling stage. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(4): 626-632
- [37] 李德全, 郭清福, 张以勤, 邹琦, 程炳嵩. 冬小麦抗旱生理特性的研究. 作物学报, 1993, 19(2): 125-132  
Li D Q, Guo Q F, Zhang Y Q, Zou Q, Cheng B S. Studies on the physiological characteristics of drought resistance in winter wheat. Acta Agronomica Sinica, 1993, 19(2): 125-132
- [38] 李凤海, 张宝石, 王志斌. 不同玉米杂交种及其亲本自交系抗旱性研究. 种子, 2008, 27(4): 77-81  
Li F H, Zhang B S, Wang Z B. Study on drought resistance of different maize hybrid and its parental inbred lines. Seed, 2008, 27(4): 77-81
- [39] 李素, 姜鸿明, 宫德衬, 孙妮娜, 孙晓辉, 李林志. 48份冬小麦主要田间农艺性状的主成分分析及抗旱性综合评价. 山东农业科学, 2014, 46(7): 25-30  
Li S, Jiang H M, Gong D C, Sun N N, Sun X H, Li L Z. Principal component analysis of primary agronomic characters and comprehensive evaluation on drought resistance of 48 winter wheat cultivars. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(7): 25-30
- [40] 石书兵, 徐文修, 张强, 克尤木, 高文伟. 旱作春小麦品种高产抗旱特性的综合评价. 干旱地区农业研究, 2001, 19(2): 14-20  
Shi S B, Xu W X, Zhang Q, Ke Y M, Gao W W. Study on drought resistance and high yield for comprehensive evaluation of spring wheat varieties in rainfed land. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(2): 14-20