

小麦直立株型种质耐密性评价及鉴定指标筛选

刘梦莹¹, 张玉¹, 张嘉豪¹, 陈建省^{1,2}, 张卫东^{1,2}, 孟庆福³, 马玉华³, 鄢照新⁴

(1. 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; 2. 小麦育种全国重点实验室, 山东泰安 271018;

3. 青岛中农智慧控股集团有限公司, 山东青岛 266400; 4. 青岛山农金麦农业科技有限公司, 山东青岛 266400)

摘要:作为一种特殊株型,小麦直立株型的特点是分蘖直立生长,冠层紧密,常规行距种植行间空隙大,而且直立株型小麦冠层穗容量较大,如果增加播量,缩减行距,可提高小麦产量。因此,有必要研究直立株型小麦在密植条件下的性状表现。本研究以15个不同亲本来源的直立株型小麦品系为材料,在高密度(3.30×10^6 株· hm^{-2})、超高密度(4.50×10^6 株· hm^{-2})下种植,调查了9个主要农艺性状;计算性状耐密系数,通过主成分分析进行指标转化,计算综合耐密评价价值(D 值);利用逐步回归分析方法建立数学模型,筛选适合的耐密鉴定指标。结果表明,在适当高密条件下,直立株型小麦可以获得较高的籽粒产量;3个综合指标的累计贡献率为85.24%,依据 D 值聚类分析可将15个材料分为极强、强、中度和弱耐密型小麦;其中6个性状,包括鲜重(X_7)、千粒重(X_4)、倒伏程度(X_9)、单位面积穗数(X_2)、株高(X_5)和机械强度(X_8),可作为小麦直立株型品系的耐密性鉴定的核心指标,耐密性评估数学模型为 $D = 4.330X_7 + 8.838X_4 - 0.325X_9 + 0.463X_2 + 4.501X_5 + 2.092X_8 - 18.499$,估计精度在89.20%以上。

关键词: 小麦;耐密性;主成分分析;隶属函数法;逐步回归

中图分类号:S512.1;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)03-0349-11

Evaluation and Screening of Identification Indices of Planting Density Tolerance in Common Wheat Germplasm with Erect Plant Type

LIU Mengying¹, ZHANG Yu¹, ZHANG Jiahao¹, CHEN Jiansheng^{1,2},
ZHANG Weidong^{1,2}, MENG Qingfu³, MA Yuhua³, YAN Zhaoxin⁴

(1. College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. National Key Laboratory of Wheat Breeding, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Qingdao Zhongnong Intelligent Holdings Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266400, China; 4. Qingdao Shannong Jinmai Agricultural Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266400, China)

Abstract: As a special plant type, the erect plant type of wheat is characterized by upright tillering growth, tight canopy, large inter-row gaps in conventional row spacing planting, and large spike capacity in the wheat canopy. If the sowing rate increased and the row spacing reduced, wheat yield can be improved. Therefore, it is necessary to explore the unique agronomic characteristics of this type of wheat germplasm under dense planting conditions. In this study, 15 wheat lines with erect plant type derived from different parents were used as experimental materials. The wheat lines were planted under two higher planting densities. Nine main agronomic characters were investigated and the density tolerance coefficients (DTC) was calculated. DTC of the nine agronomic traits were transformed into comprehensive indicators through principal component analysis and the comprehensive density tolerance evaluation value D was calculated to evaluate the density tolerance of the erect plant type wheat. A mathematical model was established using stepwise regression analysis method, and suitable densi-

收稿日期:2024-04-07

修回日期:2024-08-18

基金项目:山东省科技厅良种工程(2022LZGC005);青岛市科技惠民示范专项项目(23-2-8-xdny-18-nsh)

第一作者 E-mail:1791133575@qq.com(刘梦莹)

通讯作者 E-mail:zhangwd@sdau.edu.cn(张卫东)

ty identification indicators were screened. The results showed that under appropriate high planting density conditions, erect plant type wheat achieved higher grain yields. The cumulative contribution rate of three comprehensive indicators was 85.24%. Based on D value clustering analysis, 15 materials can be divided into extremely strong, strong, moderate, and weak tolerant lines to planting density. Six core evaluation traits, including fresh weight(X_7), thousand grains weight(X_4), lodging degree(X_9), number of ears per hectare(X_2), plant height(X_5), and mechanical strength(X_8) were screened as indices to identify the planting density tolerance of erect plant wheat. The mathematical model for evaluating the planting density tolerance of upright wheat is $D=4.330X_7+8.838X_4-0.325X_9+0.463X_2+4.501X_5+2.092X_8-18.499$, with an estimation accuracy of over 89.20%.

Keywords: Common wheat; Density-tolerance; Principal components analysis; Membership function method; Stepwise regression analysis method

理想的作物株型是培育高产品种的一条有效途径。株型是指植株地上部分的空间布局,包括植株的高矮、分枝大小和分散程度等^[1]。在小麦中,许多学者还采用广义概念,将株型定义为与产量相关的所有形态特征,包括叶片的伸展角度、宽窄长短,穗的大小和小穗分布,根在土壤中的生长状态,以及个体的整体形态等^[2]。

良好的小麦株型可以大幅提高小麦植株对水、光、气等资源的利用,实现群体的通风透气和高光效^[3]。生产实践中,人们常用紧凑、半紧凑、松散、半松散描述小麦株型,这有助于描述小麦的品种特性和区分小麦品种^[4]。由于小麦株型容易受环境条件的影响,同一品种在不同环境下的株型表现有很大差异,因此关于小麦株型的系统性研究比较少。张其鲁等^[5]依据小麦品种(系)田间单株的扩张大小,将小麦株型分为 4 种基本类型:W 型、V 型、长条形、线状型;同时用植株高度和穗层宽度的比值作为衡量指标,量化描述小麦株型。Zhao 等^[6]以单株中最大的分蘖间角度作为株型指标,衡量小麦分蘖的离散程度;同时利用遗传群体,对小麦分蘖角度进行 QTL 定位和功能验证,获得了 2 个与分蘖角度相关的主效 QTL,分别位于 1AL 和 5DL 染色体上,其对紧凑表型贡献率为 26.2%和 9.0%。

适当的小麦种植密度有利于单株和群体生长,协调群体透光性和光合效率,同时群体密度需要适应小麦生长的各个阶段^[7-8]。现已广泛证实作物密植能够有效增加生物产量,但是密植可能会引起作物的不良反应^[9-10]。小麦过度密植会造成植株拥挤,群体通风不畅,光照减少,影响光合作用,极易造成倒伏^[11]。作物耐密性差异存在于相同作物的品种(系)之间,也存在于同一品种

(系)的性状之间,如小麦的群体穗数耐密性一般小于穗粒数^[12-13]。因此,作物耐密性评价和筛选成为作物栽培研究的主要内容之一。

当前作物耐密性研究集中于主干突出的作物,许多学者采用不同方法研究作物种质资源的耐密特征和评价方法。洪德峰等^[14]采用 LSD 多重比较方法,研究 14 个夏玉米的农艺性状和产量构成因子的耐密系数,筛选出了耐高密的玉米品系。金武等^[15]采用主成分分析和聚类方法,评价大豆品种耐密特性,筛选出耐密型材料。关周博等^[16]针对甘蓝型油菜农艺性状与单株产量,采用灰色关联度和通径分析方法,分析其耐密性特征,为耐密油菜的选育提供了依据。

目前,小麦的种植密度研究多以特定类型、特定品种为材料,分析种植密度对产量、农艺特点、生理生化特征的影响,目的是探讨试验材料的适当栽培密度及其高产形成机制^[17-18]。现有研究表明,依据品种特性调整密度有利于产量三要素在群体中形成最优配置,密度的调整也可以通过影响冠层结构、干物质转运累积、光合效率等影响小麦群体质量^[19-20],进而影响小麦产量。

直立株型小麦是一类特殊类型的种质材料,是常规育种程序中的一种超亲遗传后代,不同于 V 型的紧凑型小麦,该类材料分蘖直立、地上株型成 U 型(桶状)^[5],冠层的单位穗容量比较大,按当前常规方式种植,则行间冠层间距大,不能有效利用地上空间。如果采用密植、缩小行距的栽培方式,则可充分利用土地空间资源,增加单位土地面积的穗数。但是,密植、缩小行距也可能导致群体中植株相互遮荫,影响个体发育,进而影响作物群体的发育质量。因此,有必要研究这类小麦种质的耐密性特征。

本研究以不同亲本来源的 15 个直立株型小麦品系为材料,在 高密、超高密两个密度下种植,调查 9 个主要农艺性状的表型特征,计算性状耐密系数,获得耐密性综合评价值;根据多元线性回归方程,确定评价直立株型小麦耐密性的主要性状,以期 为直立株型小麦的品种选育和栽培技术优化提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

本研究所用直立株型小麦品系均由山东农业大学小麦育种国家重点实验室杂交小麦课题组提供(表 1),该类小麦品系一般冠幅窄而厚、大穗大粒,茎秆粗壮、弹性好。其中部分品系为双亲的单交后代,亲本为适于黄淮麦区种植的国家或省级审定品种;另一部分品系来自太谷核不育 *Ta1(Ms2)* 小麦轮回选择群体,该群体早期是利用小麦

Ta1(Ms2) 为母本,以 10 余个综合性状优良的品种作为父本,分别杂交,等量混合而创建,在随后的群体世代中逐年加入新的种质资源,创建了小麦轮回选择改良群体,从中选择优良变异可育株。

试验地点是山东农业大学农学试验站小麦试验田(山东泰安),在两个小麦生长季进行试验,第一生长季为 2019 年 10 月 3 日播种,2020 年 6 月 3 日收获;第二季为 2020 年 10 月 12 日播种,2021 年 6 月 9 日收获。试验采取裂区设计,种植密度为主区,品系为副区。每个供试小麦品系种植小区为 1.1 m 播幅,7 行条播,8 m 长。设置高密度 3.30×10^6 株 \cdot hm⁻² 和超高密 4.50×10^6 株 \cdot hm⁻² 共 2 个处理,每处理设 3 重复,每个品系共种植 6 个试验小区(2 个处理 \times 3 次重复)。同时按常规试验条件(种植密度 2.25×10^6 株 \cdot hm⁻²)设置济麦 22 号对照,1.1 m 播幅,6 行条播。每 9 个小区设置一个对照。

表 1 供试的直立株型小麦品系

Table 1 Information of erect wheat lines in this study

序号 Code	样本名称 Sample name	来源 Source
1	ZL13-19	山农 055525 \times 周麦 18 号 Shannong 055525 \times Zhoumai 18
2	ZL14-13	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
3	ZL15-34	山农 22 号 \times 郑麦 366 Shannong 22 \times Zhengmai 366
4	ZL15-65	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
5	ZL15-32	山农 25 号 \times 济麦 22 号 Shannong 25 \times Jimai 22
6	ZL16-31	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
7	ZL16-45	烟农 19 号 \times 山农 28 号 Yannong 19 \times Shannong 28
8	ZL17-87	山农 18 号 \times 农大 3488 Shannong 18 \times Nongda 3488
9	ZL17-24	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
10	ZL17-87	良星 99 \times 山农 29 号 Liangxing 99 \times Shannong 29
11	ZL17-29	山农 23 号 \times 山农 20 号 Shannong 23 \times Shannong 20
12	ZL14-25	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
13	ZL18-21	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population
14	ZL18-30	西农 219 \times 山农 26 号 Xinong 219 \times Shannong 26
15	ZL19-37	用 <i>Ta1(Ms2)</i> 小麦轮选群体选育的半冬性小麦品系 Half winter wheat lines selected from <i>Ta1(Ms2)</i> wheat rotation population

于 2019 年和 2020 年适时播种,播种前施复合肥(N:P:K=17:17:17)750 kg·hm⁻² 作基肥,常规田间管理,于 2020 年和 2021 年收获季适时收获。

1.2 性状调查与测定

小区齐苗后,每个重复固定两个有代表性、长势均匀的样点,用 1 m 双行法测定群体总茎数,拔节期调查分蘖数;成熟期调查有效穗数,换算出最大分蘖数和单位面积穗数;成熟期测定穗粒数。于开花期分行选取 20 个开花时间、株高及穗型相近的单茎挂牌标记,乳熟后期测定地上部株高、重心高度、鲜重等。使用 YYD-1 植物茎秆强度测定仪(托普仪器)测定第二节间中部机械强度,计算倒伏指数(lodging index)^[13]。开花到成熟期,观察记录田间倒伏情况。成熟后每试验小区实收测产,测定千粒重。

倒伏指数=单株鲜重×重心高度/机械强度

1.3 耐密系数的计算与分析

用 Excel 2010 处理数据,t 检验分析性状指标显著性,SPSS 25.0 进行主成分分析、隶属函数分析、系统聚类分析以及建立多元回归模型。

参试品系各个指标性状的耐密系数(density tolerance coefficient,DTC)为高密度性状值和超高密度性状值之间的比值,调查性状值取两年平均值。为了便于根据综合评价值鉴定小麦品系耐密性,重心高度、株高、倒伏面积等指标的耐密系

数计算公式为:DTC=高密度性状值/超高密度性状值;其他指标性状的耐密系数=超高密度性状值/高密度性状值。

主成分分析:将各指标性状的耐密系数标准化处理后,根据相关系数矩阵判定各指标的相关程度,利用协方差矩阵计算特征值、单位特征向量,以及确定主成分表达式,确定主成分个数,选取主成分,计算主成分累积方差贡献率,得出综合评价(D)。

隶属函数值计算: $\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$

综合指标权重计算: $W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i$

综合评价(D 值)计算: $D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_i]$

以上式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; X_i 为第 i 个主成分值, X_{\min} 和 X_{\max} 为每个主成分得分最小值和最大值, W_i 为第 i 个主成分权重, P_i 为提取主成分的特征值。聚类分析方法为组间联接,以平方欧式距离 λ 为度量标准,根据 D 值划分耐密等级。通过逐步回归方法建立小麦直立株型品系的耐密性评价数学模型。

2 结果与分析

2.1 密植处理对直立株型小麦主要性状的影响

密植结果(表 2)表明,在产量及其产量构成要素方面,参试直立株型小麦品系的平均产量在高

表 2 密植处理下直立株型小麦的主要性状参数

Table 2 Main traits of erect plant wheat lines under high planting density

性状 Trait	高密度均值±标准差 Mean±SD under high planting density	超高密植平均值±标准差 Mean±SD under super high planting density	对照品种(济麦 22 号) Control(Jimai 22)
最大群体 MP/(10 ⁶ 株·hm ⁻²)	7.62±1.11B	8.67±0.94A	13.35
穗数 SN/(10 ⁶ 穗·hm ⁻²)	4.77±0.53B	5.71±0.73A	6.64
穗粒数 GN	47.25±5.06a	46.12±6.08b	41.50
千粒重 TKW/g	51.62±4.97a	49.76±4.27b	38.40
株高 PH/cm	71.35±6.20b	73.25±5.26a	73.00
重心高度 BH/cm	47.24±2.67b	49.14±3.35a	45.30
鲜重 FW/g	13.16±2.24a	11.91±2.79b	11.97
机械强度 MS	1 176.80±123.60a	1 087.60±67.80b	987.60
倒伏程度 LD	1.51±0.26b	2.56±1.02a	2.34
产量 Y/(kg·hm ⁻²)	8 677.50±536.00	9 610.90±716.00	9 054.00
抗倒指数 LRI	1.89±0.29	1.85±0.34	1.82

MP:最大群体;SN:穗数;GN:穗粒数;TKW:千粒重;PH:株高;BH:重心高度;FW:鲜重;MS:机械强度;LD:倒伏程度;Y:产量;LRI:抗倒指数。下同。比较高密度和超高密度条件,大小写字母分别代表差异极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)。

MP: Maximum population; SN: Spike numbers; GN: Grain number per spike; TKW: Thousand kernels weight; PH: Plant height; BH: Height of gravity center; FW: Fresh weight; MS: Mechanical strength; LD: Lodging degree; Y: Yield; LRI: Lodging resistance index. The same in tables 3, 4 and 7. Comparison between high planting density and super high planting density conditions; capital and lowercase letters represent significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

密度(3.30×10^6 株· hm^{-2})下为 $8\ 677.5$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,明显低于济麦 22 号常规密度(2.25×10^6 株· hm^{-2})的产量($9\ 054.0$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $P < 0.05$);超高密度(4.50×10^6 株· hm^{-2})时,直立株型小麦平均产量是 $9\ 610.95$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量变化范围为 $8\ 823.9 \sim 10\ 248.6$ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,也明显高于常规种植的对照品种济麦 22 号($P < 0.05$),平均增产幅度为 12.3% 。

由此可见,株型直立小麦种植密度较低时,冠层中穗的分布集中,穗数不足,产量下降。在一定范围内再增大种植密度后,穗数相应增加,产量上升。同时,不同品系耐密性具有差异,导致增密条件下呈现出不同的性状反应类型。

同时,种植密度增加显著影响直立株型小麦的各种农艺性状(表 2)。与高密度相比,超高密度使最大群体数量、单位面积穗数、株高、重心指数等提高,其中倒伏程度增加了 69.53% ,穗数增加了 16.83% ;相反,超高密度使穗粒数、千粒重、鲜重和机械强度分别下降了 2.39% 、 3.60% 、 9.50% 和 7.58% 。

2.2 参试小麦品系各项指标的耐密系数及相关性分析

超高密度条件下,不同测定指标性状的耐密系数在参试品系之间存在较大差异(表 3)。品系

之间耐密差异最大的为倒伏程度和穗数,变异系数分别为 11.39% 和 10.08% ;品系之间耐密变异系数最小,为株高 0.37% 。因此,单一性状的耐密系数可以用来评价小麦品系的单项指标耐密能力,但是不能全面反映其综合耐密能力。

为了更准确地评价各参试直立株型品系的耐密性,分析了 9 个测定指标的相关性(表 4)。结果表明,9 个性状之间存在不同程度的相关性,均达到显著($P < 0.05$)或极显著水平($P < 0.01$),有必要进行主成分分析。

2.3 参试小麦品系耐密性状的主成分分析

对直立株型小麦 9 个单项指标耐密系数进行主成分分析,获得综合指标贡献率和各个主成分对应的特征向量(表 5),结果显示,前 3 个综合指标的累计贡献率为 85.272% ,可以代表 9 个单项指标进行耐密评价。其中,第 1 主成分相当于 4.365 个原始指标,反映了 48.499% 原始指标信息,主要性状分量是最大群体数(X_1)和穗数(X_2),其特征向量值绝对值相对较大,为 0.211 和 0.210,说明直立株型小麦的耐密性主要取决于群体的大小,包括最大群体和单位面积的穗数;第 2 主成分相当于 2.183 个原始指标,主要性状分量是株高(X_5)、重心高度(X_6)和倒伏程度(X_9),

表 3 不同直立株型小麦品系各单项指标的耐密系数

Table 3 Dense tolerance coefficient(DTC) of each single index of different erect wheat lines

序号 Code	最大群体 MP(X_1)	穗数 SN(X_2)	穗粒数 GN(X_3)	千粒重 TKW(X_4)	株高 PH(X_5)	重心 BH(X_6)	鲜重 FW(X_7)	机械强度 MS(X_8)	倒伏程度 LD(X_9)
1	1.165	1.388	0.967	0.967	0.969	0.956	0.939	0.948	0.968
2	1.159	1.297	0.973	0.965	0.968	0.954	0.932	0.951	0.833
3	1.124	1.058	0.982	0.961	0.973	0.965	0.904	0.921	0.933
4	1.137	1.148	0.976	0.952	0.971	0.963	0.924	0.930	0.895
5	1.140	1.158	0.972	0.969	0.970	0.960	0.910	0.927	0.810
6	1.144	1.198	0.971	0.956	0.968	0.952	0.908	0.908	1.020
7	1.108	1.035	0.979	0.962	0.978	0.967	0.914	0.937	0.789
8	1.126	1.083	0.978	0.971	0.976	0.967	0.892	0.918	1.008
9	1.128	1.100	0.977	0.959	0.975	0.966	0.883	0.900	0.988
10	1.134	1.134	0.976	0.966	0.970	0.959	0.917	0.932	0.944
11	1.115	1.047	0.985	0.951	0.971	0.962	0.889	0.910	0.952
12	1.152	1.265	0.974	0.973	0.974	0.965	0.937	0.956	0.771
13	1.131	1.112	0.977	0.963	0.977	0.967	0.902	0.914	0.958
14	1.161	1.317	0.969	0.964	0.979	0.969	0.928	0.943	0.739
15	1.161	1.374	0.968	0.96	0.972	0.964	0.904	0.906	0.714
平均值 Mean	1.139	1.181	0.975	0.963	0.973	0.962	0.912	0.927	0.887
标准差 SD	0.018	0.119	0.005	0.006	0.004	0.005	0.017	0.018	0.101

序号同表 1。下同。

The material numbers are the same in table 1. The same in below.

表 4 各单项指标耐密系数的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of density dense tolerance coefficient(DTC) of each single index

指标 Index	最大群体 MP(X_1)	穗数 SN(X_2)	穗粒数 GN(X_3)	千粒重 TKW(X_4)	株高 PH(X_5)	重心 BH(X_6)	鲜重 FW(X_7)	机械强度 MS(X_8)	倒伏程度 LD(X_9)
X_1	1	0.973**	-0.893	0.321	-0.301	-0.368	0.654**	0.424	-0.393
X_2	0.973**	1	-0.891**	0.280	-0.261	-0.332	0.654**	0.424	-0.457
X_3	-0.893**	-0.891	1	-0.299	0.213	0.341	-0.560*	-0.286	0.374
X_4	0.321	0.280	-0.299	1	0.194	0.089	0.387	0.555*	-0.225
X_5	-0.301	-0.261	0.213	0.194	1	0.916**	-0.201	-0.017	-0.255
X_6	-0.368	-0.332	0.341	0.089	0.916**	1	-0.310	-0.129	-0.276
X_7	0.654**	0.654**	-0.560	0.387	-0.201	-0.310	1	0.906**	-0.451
X_8	0.424	0.424	-0.286	0.555*	-0.017	-0.129	0.906**	1	-0.435
X_9	-0.393	-0.457	0.374	-0.225	-0.255	-0.276	-0.451	-0.435	1

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双尾)显著和极其显著相关性。

* and ** represent significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels(two tailed), respectively.

表 5 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 5 Eigenvectors and percentage of accumulated contribution of principal components

主成分 Principle component		CI ₁	CI ₂	CI ₃
特征值 Eigen value		4.365	2.183	1.127
贡献率 Contribution ratio/%		48.499	24.250	12.523
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%		48.499	72.749	85.272
特征向量 Eigen vector	X_1	0.211	-0.044	-0.261
	X_2	0.210	-0.026	-0.298
	X_3	-0.194	0.038	0.360
	X_4	0.105	0.209	0.330
	X_5	-0.071	0.404	-0.163
	X_6	-0.095	0.390	-0.209
	X_7	0.197	0.058	0.315
	X_8	0.159	0.155	0.527
	X_9	-0.116	-0.260	0.211

CI:综合指标值。下同。

CI: The value of each variety's comprehensive index. The same in table 6.

其特征向量绝对值较高,分别为 0.404、0.390 和 0.260,反映了 24.250%原始指标信息,株高等性状影响直立株型小麦耐密性;第 3 主成分相当于 1.127 个原始指标,主要性状分量为穗粒数(X_3)、千粒重(X_4)、鲜重(X_7)和机械强度(X_8)等,反映了原始指标信息的 12.523%,说明相对

于前两个主成分,性状分量中的穗粒数、千粒重等对耐密性也有一定贡献。

2.4 参试小麦品系综合指标及综合评价

2.4.1 隶属函数分析

参试直立小麦材料主成分综合指标值和隶属函数值见表 6。 $\mu(X_i)$ 是指在高密度种植条件下,第 i 个综合指标值的隶属函数值,数值在 0~1 区间内,数值越大表示耐密性越强。如在综合指标值 CI₁ 主成分中,品系 1 的 $\mu(X_1)$ 最大,为 1,表明在 CI₁ 综合指标下品系 1 表现为耐密性最强,相应地品系 11 的 $\mu(X_1)$ 为 0,表明在 CI₁ 综合指标下该直立小麦品系耐密性最小。

2.4.2 权重确定

根据各主成分贡献率计算 3 个主成分综合指标的权重,分别为 0.569、0.284 和 0.147(表 6)。

2.4.3 综合评价及分类

根据 D 值大小初步判断不同直立小麦品系的耐密性(表 6)。品系 12 的 D 值最大为 0.868,表明其耐密性最强;品系 11 的 D 值最小,分别为 0.197,表明该品系耐密性最小,在高密度种植条件下性状变劣程度大。

根据 D 值对直立株型小麦品系进行聚类分析(图 1),将 15 个小麦品系分成 4 类。品系 1、品系 2、品系 12 和品系 14 为第一类,属极强耐密型;品系 5、品系 7、品系 10 和品系 15 为第二类,属强耐密型;品系 3、品系 4、品系 6、品系 8 和品系 13 为第三类,品系数量最多,为中等耐密型;品系 9 和品系 11 为第四类,属弱耐密型。

表 6 各参试材料的综合指标及评价
Table 6 Comprehensive index and valuation of materials

材料序号 Material number	CI ₁	CI ₂	CI ₃	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	D 值 D value	VP 值 VP value	耐密性综合评价 Comprehensive evaluation of density-tolerance
1	1.658	-0.842	0.504	1	0.327	0.836	0.785	0.781	极强 Extremely strong
2	1.288	-0.734	0.923	0.884	0.357	0.949	0.743	0.745	极强 Extremely strong
3	-0.928	0.056	0.627	0.186	0.572	0.869	0.396	0.405	中等 Medium
4	-0.099	-0.418	0.004	0.447	0.443	0.702	0.483	0.479	中等 Medium
5	0.348	-0.029	0.162	0.588	0.549	0.744	0.600	0.591	强 Strong
6	0.066	-2.040	-0.565	0.499	0	0.549	0.365	0.363	中等 Medium
7	-0.778	1.466	0.786	0.233	0.957	0.912	0.539	0.534	强 Strong
8	-0.894	0.599	0.409	0.197	0.720	0.811	0.436	0.433	中等 Medium
9	-1.240	-0.177	-1.025	0.088	0.509	0.426	0.257	0.252	弱 Weak
10	0.049	-0.595	1.114	0.494	0.394	1	0.540	0.539	强 Strong
11	-1.520	-0.897	0.143	0	0.312	0.739	0.197	0.200	弱 Weak
12	1.089	1.297	0.981	0.821	0.911	0.964	0.868	0.875	极强 Extremely strong
13	-0.777	0.624	-0.393	0.234	0.727	0.596	0.427	0.433	中等 Medium
14	1.012	1.623	-1.057	0.797	1	0.417	0.799	0.794	极强 Extremely strong
15	0.726	0.068	-2.612	0.707	0.575	0	0.566	0.569	强 Strong
权重 Weight coefficient					0.569	0.284	0.147		

$\mu(X_i)$: 隶属函数值; D 值: 综合评价值; VP 值: 根据逐步回归方程计算出的预测值。

$\mu(X_i)$: The value of membership function; D value: Comprehensive valuation; VP: The predicted value calculated from stepwise regression equations.

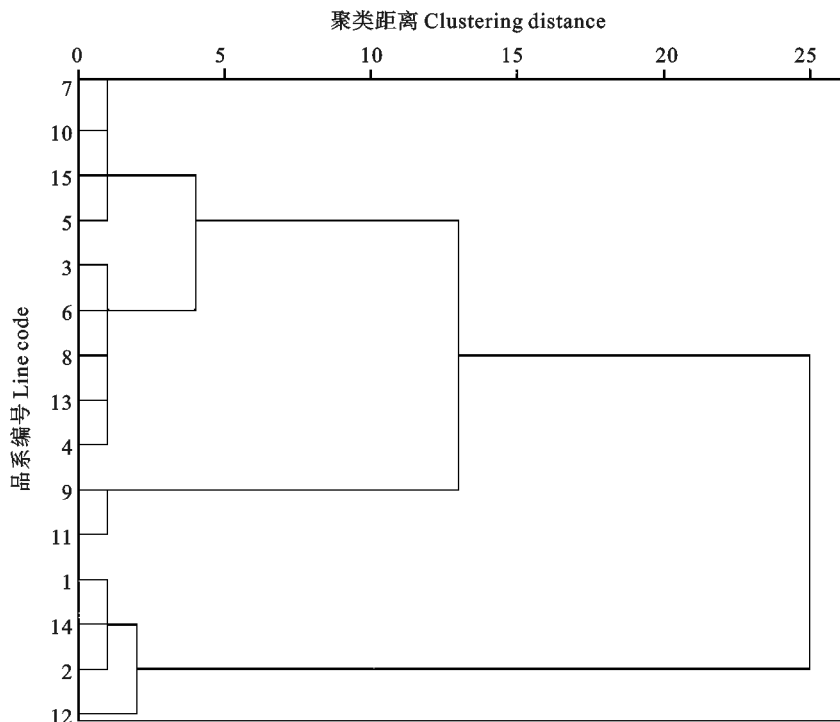


图 1 直立株型小麦 15 个参试材料树状聚类图
Fig. 1 Dendrogram of clusters for 15 erect wheat lines

2.5 耐密指数回归分析及鉴定指标选择

为明确各指标耐密性与小麦品系综合评价价值 D 值之间的关系,筛选可靠的耐密性鉴定指标,通过逐步回归途径建立直立小麦耐密性评价模型: $D = 4.330X_7 + 8.838X_4 - 0.325X_9 + 0.463X_2 + 4.501X_5 + 2.092X_8 - 18.499$ 。上述公式表明,6 个指标对小麦耐密性有显著影响,其中对耐密性影响最大的性状指标依次为鲜重、千粒重、倒伏程度、穗数、株高和机械强度。使用该回归方程预测耐密性 D 值,其预测值(VP)与综合评价价值(D)拟合结果良好($R^2 = 0.993, P < 0.001$),对 15 份资源材料的估计精度均在 95% 以上(表 6)。上述 6 个性状的耐密性对直立株型小麦综合耐密性具有较大影响,在以后的工作中,可根据此 6 个性状的耐密指数评估耐密综合评价价值 D ,预测品系耐密性。

2.6 耐密类型性状特征分析

依据参试小麦耐密相关性状逐步回归结果,获得影响耐密综合评价价值的 6 个性状,聚类分析将 15 个直立株型小麦分为 4 类。比较 4 类耐密差异小麦在两种密度下的主要性状表现,探讨 4 类小麦之间的耐密性差异是否体现在主要性状表现方面(表 7)。结果表明,4 类小麦的耐密性从极强耐密性到弱耐密性,千粒重、穗数和机械强度表现出规律性变化,不同类型间存在显著差异($P < 0.05$)。第一类极强耐密性小麦的特点是千粒重大,穗数少,机械强度高;第四类弱耐密性小麦的特点是千粒重小,穗数多,机械强度大;第二类强耐密性和第三类中等耐密性材料,千粒重、穗数和机械强度均为中等。鲜重、倒伏程度和株高在不同耐密类型小麦间不存在规律性的变化趋势,不同类型间无表型差异。

表 7 不同耐密类型直立小麦材料的性状
Table 7 Characteristics of different density-tolerant types in wheat lines

性状 Trait	耐密类型 Density tolerance type	高密度 High density	超高密度 Superhigh density
鲜重 FW/g	极强 Extremely strong	14.3 ± 1.8a	13.5 ± 1.25a
	强 Strong	13.7 ± 0.9a	11.9 ± 0.98ab
	中等 Medium	10.9 ± 1.2b	9.4 ± 1.1c
	弱 Weak	13.4 ± 1.1a	11.3 ± 1.2bc
千粒重 TKW/g	极强 Extremely strong	53.2 ± 2.3a	52.3 ± 2.52a
	强 Strong	50.3 ± 2.47ab	49.5 ± 1.98ab
	中等 Medium	48.9 ± 3.1bc	47.8 ± 2.13bc
	弱 Weak	47.2 ± 2.8c	46.3 ± 1.65c
倒伏程度 LD	极强 Extremely strong	1.64 ± 0.31a	2.78 ± 0.89a
	强 Strong	1.49 ± 0.29a	2.54 ± 1.03a
	中等 Medium	1.42 ± 0.34a	2.47 ± 1.24a
	弱 Weak	1.55 ± 0.27a	2.32 ± 1.11a
穗数 SN/(10 ⁶ 穗 · hm ⁻²)	极强 Extremely strong	4.34 ± 0.55c	5.13 ± 0.62c
	强 Strong	4.58 ± 0.54bc	5.55 ± 0.72bc
	中等 Medium	4.74 ± 0.46ab	6.12 ± 0.63ab
	弱 Weak	5.04 ± 0.58a	6.41 ± 0.68a
株高 PH/cm	极强 Extremely strong	68.9 ± 4.32a	70.3 ± 4.17a
	强 Strong	73.5 ± 4.47a	74.6 ± 5.23a
	中等 Medium	71.8 ± 5.67a	72.9 ± 5.78a
	弱 Weak	69.4 ± 3.87a	71.4 ± 3.56a
机械强度 MS	极强 Extremely strong	1 237.6 ± 145.6a	1 195.3 ± 125.6a
	强 Strong	1 125.6 ± 119.8ab	1 025.6 ± 957.3ab
	中等 Medium	1 037.8 ± 98.4bc	987.6 ± 105.4bc
	弱 Weak	987.3 ± 101.6c	879.3 ± 92.4c

小写字母代表同一性状同一密度下不同耐密类型之间的差异显著性($P < 0.05$)。

The lowercase letters represent the significant differences between different density-tolerance types under the same trait and density ($P < 0.05$).

3 讨论

小麦地上株型,通常为松散型、半松散和紧凑型^[21-22]。直立株型小麦是一类特殊类型的小麦资源,地上部分成条状或线型,冠层的穗容量比较大,按常规方式种植,存在行间空隙。采用增加种植密度、缩小行距的栽培方式,可以有效利用其穗容量大的优点,通过在单位土地面积中增加小麦穗数,提高小麦产量。然而,密植需要所选用的直立株型小麦材料能够适应高密度的生长环境,需要良好的群体耐密性。本研究就是在两种高种植密度下种植了 15 个不同亲本来源的直立株型小麦,测产结果表明适当增密种植条件下可以进一步提高这类小麦的产量,在生产上具有应用可能性;同时,9 个相关性状之间存在不同程度的相关性,有必要进行主成分分析,对重复信息进行降维处理。通过计算 9 个主要农艺性状的耐密系数,分析其综合耐密评价值,最终确定了 6 个评价直立株型小麦耐密性的适合指标。

3.1 直立株型小麦配合增密可以进一步提高冬小麦产量

在小麦产量构成中单位面积穗数、穗粒数和千粒重之间在群体中保持相互协调、相互制约的关系。在中国黄淮冬麦区,当前小麦产量在 $6 \times 10^3 \sim 10.5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;单位面积穗数、穗粒数和粒重协调地保持在一定范围内,穗数一般是 $4.50 \times 10^4 \sim 7.50 \times 10^6 \text{ 穗} \cdot \text{hm}^{-2}$,穗粒数 30~50,千粒重 35~60 g^[21-22]。小麦的品种特征、栽培方式、种植环境协调统一,共同形成小麦的群体特征,决定小麦的产量^[23]。本研究结果表明,直立株型小麦在高密度($3.30 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)下平均产量为 $8\,315.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最低为 $7\,485.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最高为 $9\,055.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与常规种植($2.25 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基本苗)的对照品种济麦 22 号相比,平均产量略低,但是也有少数品系产量要稍高于济麦 22 号,说明直立株型小麦在此密度下,产量多低于常规种植的济麦 22 号。当播种密度为超高密广东($4.50 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,直立小麦品系产量水平显著高于常规种植的对照品种济麦 22 号,平均高出 12.3%;同时直立小麦的产量变化也出现分化,在超高密度播量下,多数品系显著高于高密度下的产量,但是也有产量低于高密度下的产量。前人研究表明,当前小麦生产中的栽培品种,在现有种植条件下,获得高产的种植密度

多在 $2.25 \times 10^6 \sim 3.75 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围^[24-25],相应的穗数多集中在 $5.15 \times 10^6 \sim 6.60 \times 10^6 \text{ 穗} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内^[26-27]。在一定范围内增加密度可以增加单位面积穗数、提高小麦产量,继续增加密度则导致显著减产^[28-29]。直立株型小麦的穗数、粒数和千粒重应该存在同样的协调关系,但是性状数值范围值得进一步的研究。

3.2 小麦种植密度增加同时伴有不利影响

在小麦产量构成要素中,单位面积穗数被认为是最容易的人为控制因素。在当前的小麦品种中,单纯增加穗数、粒数或粒重在生产上都不会获得理想的结果。前人研究表明,小麦基本苗数与分蘖率、茎蘖总数与成穗率之间存在相互协调的关系,在加大播种量时,分蘖率和成穗率呈现下降趋势,这使得过大的种植密度导致单位面积穗数的下降^[18,30-31]。此外,增大小麦种植密度会使小麦群体环境恶化,穗粒数和千粒重降低。本研究结果表明,随着播量增加,直立株型小麦的成穗率虽然没有显著下降,但是穗粒数和千粒重则有显著下降的趋势。这说明直立小麦品系的不同性状在耐密方面具有较大差异,在生产中要获得高产,需要选择穗粒数和千粒重耐密性强的品系。

小麦种植密度的增加还可能造成大面积倒伏而导致减产。鲜重、机械强度和重心高度是小麦倒伏指数的三个重要组成性状,倒伏程度则是直观的结果和指标^[13,32-33]。本研究表明,在抗倒强度相关的三个指标中(鲜重、机械强度和重心高度),直立株型小麦随着密度增加均呈现劣化趋势。在倒伏程度上,超高密度下直立株型小麦倒伏性显著高于普通高密度种植。在倒伏程度及其倒伏指数构成要素诸方面,直立株型小麦品系间同样具有显著差异,在以后的工作中应注意选择抗倒、耐密性状优良的品系。

3.3 直立株型小麦耐密材料的评价指标和材料利用

对直立株型小麦品系进行综合评价,可以全面了解小麦性状的主成分构成和特征,在生产实践中有着重要的应用意义。本研究调查了直立株型小麦的 9 个性状,按耐密性综合评价价值 D 值划分为 4 类,极强耐密、强耐密、中等耐密型和不耐密型,这是直立株型小麦的综合耐密评价结果。但是具体到小麦品系的单项性状耐密性,有时可能与综合评价结果并不一致。在育种、栽培工作中,应结合单项性状的耐密指标,灵活地评价、应

用耐密指标。例如,在育种亲本选择方面,可以选用综合耐密性状优良的为材料作为亲本之一,与单项目标性状耐密好的材料杂交,进行系统选育,可能有利于获得更加适合的小麦材料。

小麦育种目标是获得高产、抗倒、生产中能够应用的材料,这就需要在以后的育种实践中,首先综合考量密植时高产、抗倒两个因素,作为判定直立株型小麦可用性的依据,这是小麦材料成功与否的首要因素;其次是产量和抗倒构成要素的优化,保证密植条件下有效穗数、穗粒数和千粒重的协调,保证抗倒指数相关要素的协调。

作物种质耐密性旨在探讨作物在高密度种植条件下的适应能力和生长表现。其耐密性特点涉及株型结构(叶片形态、根系特征等)、生长速度和竞争能力以及生殖机制调节变化。本研究结果可以促进密植条件下作物生长机制和适应策略的理解,为优化作物种植密度和提高产量提供理论支持。进一步的研究工作将进行进行耐密直立株型小麦品系在不同密度下的生长状况的研究,从而明确其最佳种植密度,以实现最大化产量和资源利用效率,在指导农业生产发挥作用。

4 结论

在调整种植方式条件下,直立株型小麦品系能够达到高产要求;将15个品系划分为极强耐密、强耐密、中等耐密型和不耐密型4类;筛选了鲜重、千粒重等6个核心耐密评价性状作为小麦直立株型品系的耐密性鉴定指标。

参考文献:

- [1] FORD E D. The dynamic relationship between plant architecture and competition [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 275.
- [2] GUO H, XIONG H, XIE Y, *et al.* Functional mutation allele mining of plant architecture and yield-related agronomic traits and characterization of their effects in wheat [J]. *BMC Genetics*, 2019, 20(1): 102.
- [3] 刘兆晔, 于经川, 姜鸿明, 等. 小麦理想株型的探讨[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 137.
LIU Z Y, YU J C, JIANG H M, *et al.* A discussion on ideal plant type of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(8): 137.
- [4] 国家小麦产业技术体系, 中国农业科学院作物科学研究所. 广适性小麦新品种鉴定与评价: 2016—2017年度[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 105.
National Wheat Industry Technology System, Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Identification and evaluation of new wheat varieties with wide adaptability: 2016—2017 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 105.
- [5] 张其鲁, 陈香芝, 张立全, 等. 小麦株型分类探讨[J]. 山东农业科学, 2006, 38(1): 17.
ZHANG Q L, CHEN X Z, ZHANG L Q, *et al.* Classification of wheat plant types [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006, 38(1): 17.
- [6] ZHAO D, YANG L, XU K, *et al.* Identification and validation of genetic loci for tiller angle in bread wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133(11): 3037.
- [7] 张兰萍, 唐朝晖, 逯成芳, 等. 超级小麦理想株型品种选育初探[J]. 山西农业科学, 2007, 35(1): 26.
ZHANG L P, TANG Z H, LU C F, *et al.* Breeding of the super wheat cultivars with perfect plant shape [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, 35(1): 26.
- [8] 李朴芳, 程正国, 赵鸿, 等. 旱地小麦理想株型研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2631.
LI P F, CHENG Z G, ZHAO H, *et al.* Current progress in plant ideotype research of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2631.
- [9] 樊娜, 甘文婷, 武学霞, 等. 植物响应密度变化研究进展[J]. 分子植物育种, 2022, 12: 5.
FAN N, GAN W T, WU X X, *et al.* Advances in response of plant to density change [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 12: 5.
- [10] 李广浩, 刘娟, 董树亭, 等. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2247.
LI G H, LIU J, DONG S T, *et al.* Effects of close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2247.
- [11] 淮贺举, 陆洲, 秦向阳, 等. 种植密度对小麦产量和群体质量影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 1.
HUAI H J, LU Z, QIN X Y, *et al.* Advances of researches in plant density effects on the wheat yield and population quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9): 1.
- [12] 任安然, 武丽芬, 关红辉, 等. 不同种植密度下玉米茎秆纤维性状和抗倒性相关分析[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 653.
REN A R, WU L F, GUAN H H, *et al.* Stalk fiber related traits and lodging resistance correlation analysis under different planting density in maize [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 653.
- [13] 郑亭, 陈溢, 樊高琼, 等. 株行配置对带状条播小麦群体光环境及抗倒伏性能的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1571.
ZHENG T, CHEN Y, FAN G Q, *et al.* Effects of plant and row allocation on population light environment and lodging resistance of strip sown wheat in drill [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1571.
- [14] 洪德峰, 卫晓轶, 马俊峰, 等. 高密度对不同基因型夏玉米农艺特性、产量性状及耐密性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 13.
HONG D F, WEI X Y, MA J F, *et al.* Effects of high density on agronomic traits, yield components and tolerance of differ-

- ent high density maize genotypes [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(28): 13.
- [15] 金武, 万明月, 李俊, 等. 大豆耐密植品种评价方法的建立及耐密种质的筛选[J]. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(4): 1004. JIN W, WAN M Y, LI J, *et al.* Establishing an evaluation method for condensed planting and identification of elite germplasm resources in soybean [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(4): 1004.
- [16] 关周博, 田建华, 郑磊, 等. 适宜机械化栽培的甘蓝型油菜农艺性状与单株产量的相关性分析及耐密油菜育种探讨[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(18): 79. GUAN Z B, TIAN J H, ZHENG L, *et al.* Correlation analysis of agronomic traits and yield per plant in *Brassica napus* L. of suitable mechanization planting and study of breeding of tolerance close planting canola [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(18): 79.
- [17] 许倍铭, 冯健超, 郝紫瑞, 等. 种植密度对不同小麦品种籽粒淀粉含量及其特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(9): 1109. XU B M, FENG J C, HAO Z R, *et al.* Effect of planting density on starch content and characteristics of wheat grains [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(9): 1109.
- [18] 金彦刚, 丁锦峰, 袁权, 等. 播期和密度对江苏淮北强筋小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(18): 1. JIN Y G, DING J F, YUAN Q, *et al.* Sowing date and planting density of strong-gluten wheat in Huaibei area of Jiangsu; Effects on grain yield and quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(18): 1.
- [19] 郑飞娜, 初金鹏, 张秀, 等. 播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J]. *作物学报*, 2020, 46(3): 423. ZHENG F N, CHU J P, ZHANG X, *et al.* Interactive effects of sowing pattern and planting density on grain yield and nitrogen use efficiency in large spike wheat cultivar [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 423.
- [20] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(5): 140. LI X X, SHI Z L, WANG J C, *et al.* Effects of nitrogen application amount and planting density on dry matter accumulation and flag leaf photosynthetic characteristics for late-sowing wheat in rice-wheat rotation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(5): 140.
- [21] 刘建军, 陈康, 陈建友. 小麦绿色高产栽培理论技术体系与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019. LIU J J, CHEN K, CHEN J Y. Theoretical and technical system and practice of green and high-yield cultivation of wheat [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [22] 农业部黄淮海小麦绿色增产模式攻关专家指导组, 全国农业技术推广服务中心. 黄淮海小麦绿色增产模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 225. Expert Steering Group of the Ministry of Agriculture on Huang Huaihai Wheat Green Yield Increasing Model, National Agricultural Technology Extension Service Center. Green yield increasing model of wheat in Huanghuaihai Region [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017: 225.
- [23] 张会芳, 齐红志, 孙岩, 等. 黄淮冬麦区不同来源地新育成小麦品种性状多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(3): 719. ZHANG H F, QI H Z, SUN Y, *et al.* Character diversity analysis of new wheat varieties from different origins in Huang-Huai winter wheat region [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(3): 719.
- [24] 周秋峰, 于沐, 张果果. 种植密度对小麦生长及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(20): 35. ZHOU Q F, YU M, ZHANG G G. Effects of planting density on the growth and yield of wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(20): 35.
- [25] YANG D, CAI T, LUO Y, *et al.* Optimizing plant density and nitrogen application to manipulate tiller growth and increase grain yield and nitrogen-use efficiency in winter wheat [J]. *Peer Journal*, 2019, 7: e6484.
- [27] MA S C, WANG T C, GUAN X K, *et al.* Effect of sowing time and seeding rate on yield components and water use efficiency of winter wheat by regulating the growth redundancy and physiological traits of root and shoot [J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 166.
- [27] 乔玉强, 曹承富, 杜世州, 等. 氮肥运筹和播种密度对晚播小麦群体总茎数及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2014, 29(2): 204. QIAO Y Q, CAO C F, DU S Z, *et al.* Effects of nitrogen application and density on population dynamics and yield of late-sown wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(2): 204.
- [28] STANLEY J D, MEHRING G H, WIERSMA J J, *et al.* A decision support system to guide grower selection of optimal seeding rates of wheat cultivars in diverse environments [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 779.
- [29] LLOVERAS J, MANENT J, VIUDAS J, *et al.* Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(5): 1258.
- [30] 苏玉环, 刘庆芳, 马永安, 等. 播期和密度及其互作对小麦群体茎数及产量的影响[J]. *河北农业科学*, 2020, 24(5): 29. SU Y H, LIU Q F, MA Y A, *et al.* Effects of sowing date, density and their interaction on stem number and yield of wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(5): 29.
- [31] BASTOS L M, CARCIOCHI W, LOLLATO R P, *et al.* Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 54.
- [32] FENG S, KONG D, DING W, *et al.* A novel wheat lodging resistance evaluation method and device based on the thrust force of the stalks [J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0224732.
- [33] 李嘉豪, 刘昊东, 王伟伟, 等. 中国小麦主推品种和育成品种系的抗倒伏性评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 50. LI J H, LIU H D, WANG W W, *et al.* Evaluation of lodging resistance in main wheat varieties (lines) in China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 50.