

冯伟森,张学品,杨 莉,等. 黄淮冬麦区不同生态型旱地小麦育种遗传改良分析[J/OL]. 大麦与谷类科学,2025,42(5):26–35(2025–10–09).  
https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2025.05.004.

## 黄淮冬麦区不同生态型旱地小麦育种遗传改良分析

冯伟森,张学品,杨 莉,丁志强,赵 严,高海涛,吴少辉\*

(洛阳市农林科学院,河南 洛阳 471022)

**摘要:**我国小麦生产和育种正面临着气候变化带来的巨大影响,为了研究我国黄淮冬麦区旱地小麦品种农艺性状适应气候变化的调控机理,以黄淮冬麦区 1950—2009 年旱地推广面积较大的 40 个小麦品种为试验材料,在黄淮冬麦区河南省洛阳市种植,收获后调查平均产量、单株成穗数、可育小穗数、不育小穗数、穗粒数、有效穗数、穗长、穗质量、穗产量、单株生物产量、千粒质量、株高和抗旱指数等农艺性状,对产量性状的变化规律、产量和农艺性状的相关性及农艺性状对产量的贡献率进行分析。结果表明:随着年代际的变化,黄淮冬麦区旱地小麦品种的抗旱性先下降后回升,而株高则明显下降;各年代间产量潜力不断上升,就不同年代而言,与 1950 年代相比,2000—2009 年的品种产量增幅最大的为 70.75%;其中 1960 年代较 1950 年代产量变化幅度相对较小(提高 3.94%),1990 年代较 1980 年代产量提高幅度较大(提高 27.99%);千粒质量、穗粒数和有效穗数随年代增加均呈增加趋势,增加幅度为千粒质量 > 有效穗数 > 穗粒数。相关分析表明,产量与千粒质量(0.707<sup>\*\*</sup>)、穗粒数(0.461<sup>\*\*</sup>)、有效穗数(0.237<sup>\*\*</sup>)、可育小穗数(0.488<sup>\*\*</sup>)、穗长(0.395<sup>\*\*</sup>)、穗质量(0.633<sup>\*\*</sup>)、穗产量(0.770<sup>\*\*</sup>)、抗旱指数(0.298<sup>\*\*</sup>)呈极显著正相关。千粒质量、穗粒数和有效穗数的产量贡献值均较大且为正效应,株高表现为负效应。黄淮冬麦区旱地小麦农艺性状因气候变化而产生较强的影响,选育株高适中、抗旱抗倒性强、有效穗数适中、穗粒数较多、千粒质量较大的抗旱品种是黄淮冬麦区旱作小麦面对未来气候变化而开展育种的关键改良方向。

**关键词:**黄淮冬麦区;不同生态型;旱地小麦品种;育种性状;遗传改良

**中图分类号:**S512.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6486-20250075

作为我国第三大粮食作物,小麦种植面积占据了至少 22% 的粮食种植总面积<sup>[1-2]</sup>。黄淮麦区是我国冬小麦主产区,其小麦总产量占全国小麦的 61.6%<sup>[3]</sup>。黄淮旱作麦区,常年降水量 500 ~ 700 mm,灌溉设施匮乏,整个小麦生长期内自然降水量几乎不能满足小麦生长发育的需要,严重制约着产量的提升。1981—2020 年使黄淮海主要种植区冬小麦受灾最为严重的影响因素是重度干旱,其次为中度干旱,最后为轻度干旱。冬小麦冬前生长期发生重旱的区域在明显减少,而发生中旱的区域在明显增加;对于越冬期,黄淮海主要种植区冬小麦受灾最为严重的影响因素是特旱,其次为重度干旱,最后为中度

干旱<sup>[4]</sup>。近年来,南涝北旱,降水分布极不平衡,作物育种必须重新定向<sup>[5]</sup>。随着全球气候日益变暖,不同生态麦区的小麦农艺性状和生态适应性及育种和栽培体系技术均发生了一定的变化<sup>[6-7]</sup>。在未来水资源缺乏、降水量分布严重不均、气候变暖、病虫害频发等因素的影响下,旱地小麦新品种选育显得尤为重要,未来小麦品种的改良必须适应气候变化,才能保持可持续生产的不断强化<sup>[8-11]</sup>。山仑院士指出,20 世纪全球小麦品种改良平均年增产 30 ~ 38 kg/hm<sup>2</sup>,而半干旱区仅增产 6 kg/hm<sup>2</sup>,培育抗旱品种进程缓慢<sup>[12]</sup>。随着日益严峻的气候变化,黄淮冬麦区大面积应用推广的品种必定是适应气候变化的广适性品种<sup>[13-14]</sup>。因此,研究黄淮冬麦区旱作麦区小麦适应气候变化的育种规律,对保障黄淮冬麦区和我国粮食安全具有重大意义。为此,本研究选取代表性旱作品种,以抗旱性和产量性状为研究对象,研究黄淮麦区产量结构与产量性状的演变规律,以期黄淮冬麦区旱地小麦生产和小麦育种应对未来耕作栽培和气候变化适应性研究提供理论依据和技术支撑。

收稿日期:2025-06-30;修回日期:2025-09-27。

基金项目:国家小麦产业技术体系(CARS-03-76);河南省农业(小麦)良种联合攻关项目(2022010101);洛阳市核心技术攻关公益类专项(2302034A)。

作者简介:冯伟森(1980—),男,硕士,副研究员,主要从事旱地小麦新品种选育研究。Email: lynkyfws@126.com。

\* 通信作者:吴少辉(1972—),女,研究员,主要从事旱地小麦新品种选育研究。Email: lywushaohui@126.com。

## 1 材料与方法

试验于2021—2023年在洛阳市农林科学院旱地试验田(112°28'E, 34°38'N, 海拔119 m)进行,该地多年来作为我国黄淮冬麦区的一个典型生态试验站。针对黄淮冬麦区气候干旱特征,我们选取近60年来不同生态区域的代表性品种40个,参照GB/T 21127—2007《小麦抗旱性鉴定评价技术规范》,进行了抗旱性鉴定,并计算了其抗旱指数,作为评价小麦品种对干旱敏感程度的指标<sup>[15]</sup>。

### 1.1 试验材料

试验材料为黄淮冬麦区(河南、河北、山东、陕西、山西)1950—2009年旱地大面积推广的主推品种和推广前景较好的品种40份,其中1950年代选取平原50、出山豹、蚂蚱麦、碧蚂1号和石家庄407;1960年代选取内乡5号、阿夫、西农6028、北京8号、石家庄54和济南2号;1970年代选取郑州3号、泰山1号、丰产3号、冀麦1号、徐州14和旱选10号;1980年代选取豫麦2号、豫麦8号、昌乐5号、秦麦3号、冀麦6号、晋麦33和冀麦23;1990年代选取豫麦48、郑早1号、晋麦47、冀麦36、冀麦31、长武131、长武134和烟D27;2000—2009年代选取洛早2号、洛早6号、洛早7号、石家庄8号、烟农21、长武58、邯4589和河东TX-006。以上小麦种子均由中国农业科学院国家农作物种质资源中心提供。

### 1.2 试验设计

以随机区组试验设计为主体,设置棚内干旱胁迫和田间灌溉2个处理,3次重复,4行区种植,行长3 m,行距23 cm,小区面积2.76 m<sup>2</sup>,每个处理各120个小区,共设240个小区。人工楼播,基本苗数180万~210万株/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 农艺性状测量

试验按旱地冬小麦常规生产管理进行。在小麦全生育期详细观察、记载其生物学性状,在收获期按照品种和重复随机取样10株在室内考种,收获后调查单株成穗数(X1)、可育小穗数(X2)、不育小穗数(X3)、穗粒数(X4)、有效穗数(X5)、穗长(X6)、穗质量(X7)、穗产量(X8)、单株生物产量(X9)、千粒质量(X10)、株高(X11)、抗旱指数(X12)、平均产量(Y)(考种总粒质量记入小区产量)等性状。抗旱性鉴定程序按照国标法进行,抗旱指数参照GB/T 21127—2007《小麦抗旱性鉴定评价技术规范》计算。为进一步探讨各年代间各个性状的变化规律,我

们以该年代代表性品种的性状平均值进行阐述。

### 1.4 数据分析

采用Excel 2010和DPS 9.5数据分析系统处理和分析农艺性状相关数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 60年小麦抗旱性的变化趋势分析

黄淮冬麦区(河南、山东、安徽北部、江苏北部等)是旱灾高发区。据报道,1950—2009年,平均每3~5年发生一次区域性干旱,春旱概率70%("十年九春旱"),2010年10月冬麦区旱情发展迅猛,黄淮、江淮冬麦区作物受旱面积达386.6万hm<sup>2</sup>(其中重旱41.8万hm<sup>2</sup>,干枯2万hm<sup>2</sup>)<sup>[16-17]</sup>。1959—1961年,连续3年特大旱灾(全国性,黄淮为重灾区),1959年全国受灾4463万hm<sup>2</sup>,1960年达6546万hm<sup>2</sup>(黄淮占30%以上),1961年受灾6175万hm<sup>2</sup>。1965年春、夏、秋3季连旱,包括华北、黄淮全域,以山东、河南为中心,降水量偏少60%以上,山东部分地区4—8月降水量不足100 mm;冬小麦受旱面积达800万hm<sup>2</sup>,绝收约120万hm<sup>2</sup>,河南豫西地区减产40%。1978年江淮流域大旱波及黄淮,春旱接伏旱,持续高温(气温偏高2~4℃);1986—1987年,黄淮春旱,河南、山东土壤墒情降至40%以下,影响小麦拔节。1988—1989年冬春连旱,冬小麦受旱693.33万hm<sup>2</sup>(占在田作物1/3),重旱161.87万hm<sup>2</sup>,黄苗死苗面积15.33万hm<sup>2</sup><sup>[18-20]</sup>。黄淮冬麦区旱情呈频率增加、强度升级趋势,其驱动因素包括全球变暖背景下的环流异常与区域水循环失衡,而灌溉设施与品种适应力的不足凸显了农业的脆弱性<sup>[21-22]</sup>。未来需融合气象预测、抗旱育种和智慧灌溉技术,构建韧性农业生产体系<sup>[23]</sup>。

由图1、图2所示,随着年代的发展,上述40份黄淮冬麦区旱地小麦品种的抗旱指数表现出先降低后缓慢回升的趋势。1950年代抗旱指数为1.033,1960年代和1970年代品种抗旱性有所下降,抗旱指数均处于0.899以下,抗旱性达4级,抗旱性较弱;1980年代以后,抗旱性逐步回升,抗旱指数均处于0.900之上,抗旱级别达3级,黄淮冬麦区旱地小麦品种抗旱性和对照品种晋麦47基本相当。1980年代之前,旱地小麦品种多以农家种为主,表现为抗旱有余而丰产不足;之后适应气候变化、干旱频发,小麦育种呈多元化发展,旱地小麦育种涌现了一批批优良品种,从而出现抗旱高产相协调

的推广品种,特别是1990年代,抗旱性品种表现较为突出,产量出现质的飞跃。

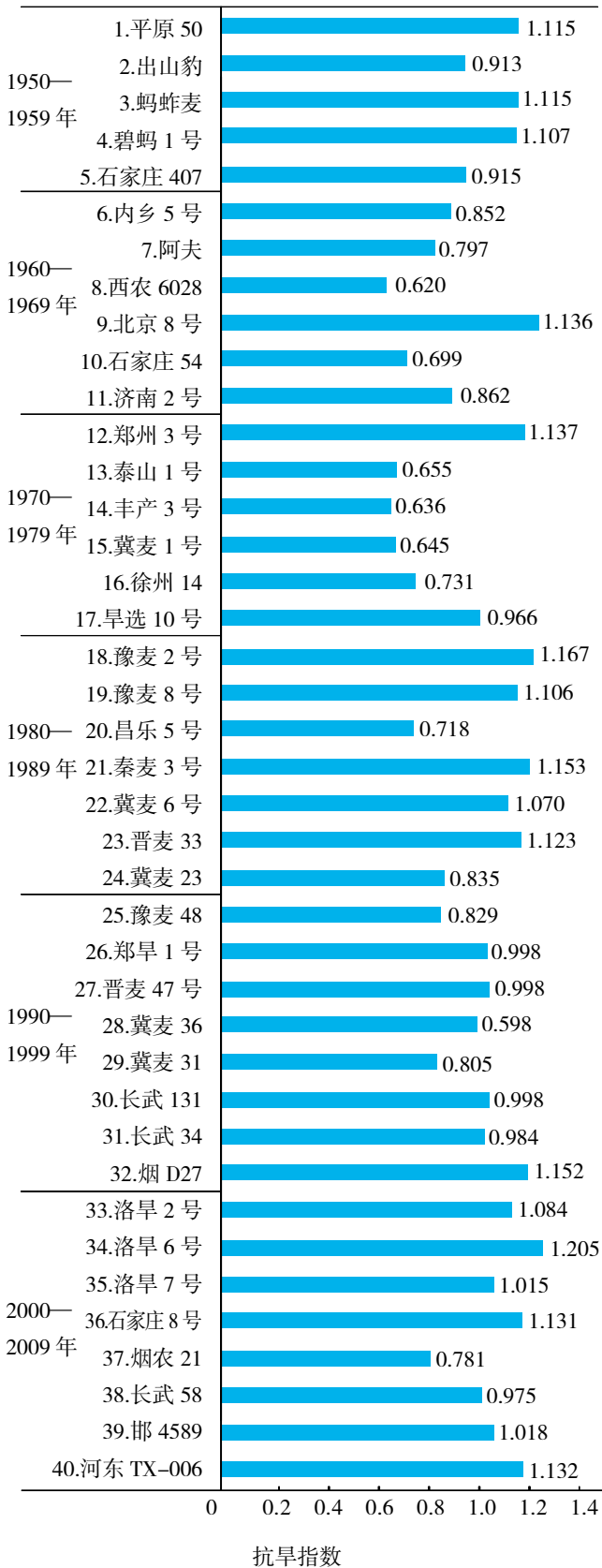


图 1 不同年代间各小麦品种抗旱指数鉴定结果

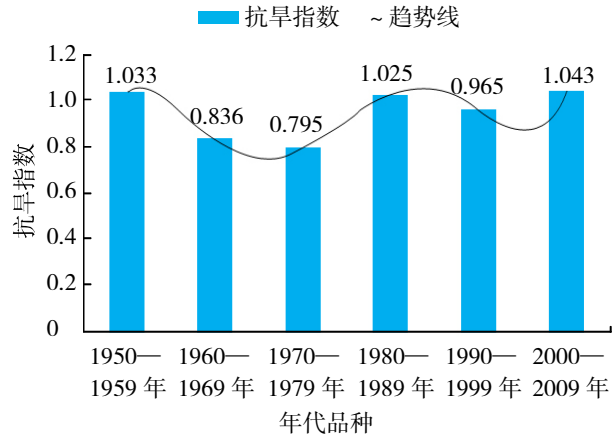


图 2 抗旱指数变化趋势

### 2.2 60年产量性状及构成因素的变异

图 3 和图 4 表明,黄淮冬麦区旱地小麦品种随着年代际的更替,产量水平不断提高,与 1950 年代品种相比,小麦产量呈随着年代增加而增加的趋势,增幅分别为 3.94%(1960 年代)、12.31%(1970 年代)、26.08%(1980 年代)、61.36%(1990 年代)和 70.75%(2000—2009 年),其中:1990 年代较 1980 年代品种产量增幅最大(27.99%),1960 年代较 1950 年代品种产量增幅最小(3.94%),1970 年代和 2000—2009 年较上年代增幅分别为 8.05%和 12.26%。就不同年代段而言,1950—1960 年代产量变化幅度不大且相对平稳,1980 年代之后变化幅度较大,产量显著性增加。

从图 5 至图 7 可以看出,千粒质量的变化总体趋势表现为稳步增长,1980 年代品种千粒质量出现小幅度波动,较 1970 年代增长不明显,增长了 0.17 g;1990 年代较 1980 年代品种千粒质量增加幅度最大(增加 17.66%)。千粒质量由 1950 年代的 28.28 g 增加到 2000—2009 年的 40.21 g,增加 42.2%。穗粒数随着年代推移明显增加,1950 年代到 1980 年代基本保持在 33 粒/穗;1990 年代后明显增加,为 37~39 粒/穗,比 1950 年代、1960 年代增加了 4~6 粒/穗;1980 年代到 1990 年代增幅最大(15.63%)。有效穗数整体变化不大,1950、1960 年代稳定在 450 万穗/hm<sup>2</sup>左右;1970 年代有下降趋势,下降至 433.04 万穗/hm<sup>2</sup>;1980 年代波动明显增加,达 488.20 万穗/hm<sup>2</sup>;1990 年代至 21 世纪初(2000—2009 年)趋于平稳,有效穗数基本维持在 450 万穗/hm<sup>2</sup>左右,这与当时年代育种实际相符合,1950 年代、1960 年代主要是农家种,1970 年代水浇地品种涌现替代了旱地品种,1980 年代抗旱小麦品种优势在丰产年份不突出,水地品种在生产上占据主导地位,有效穗数增加是符合年代际发展趋势的。

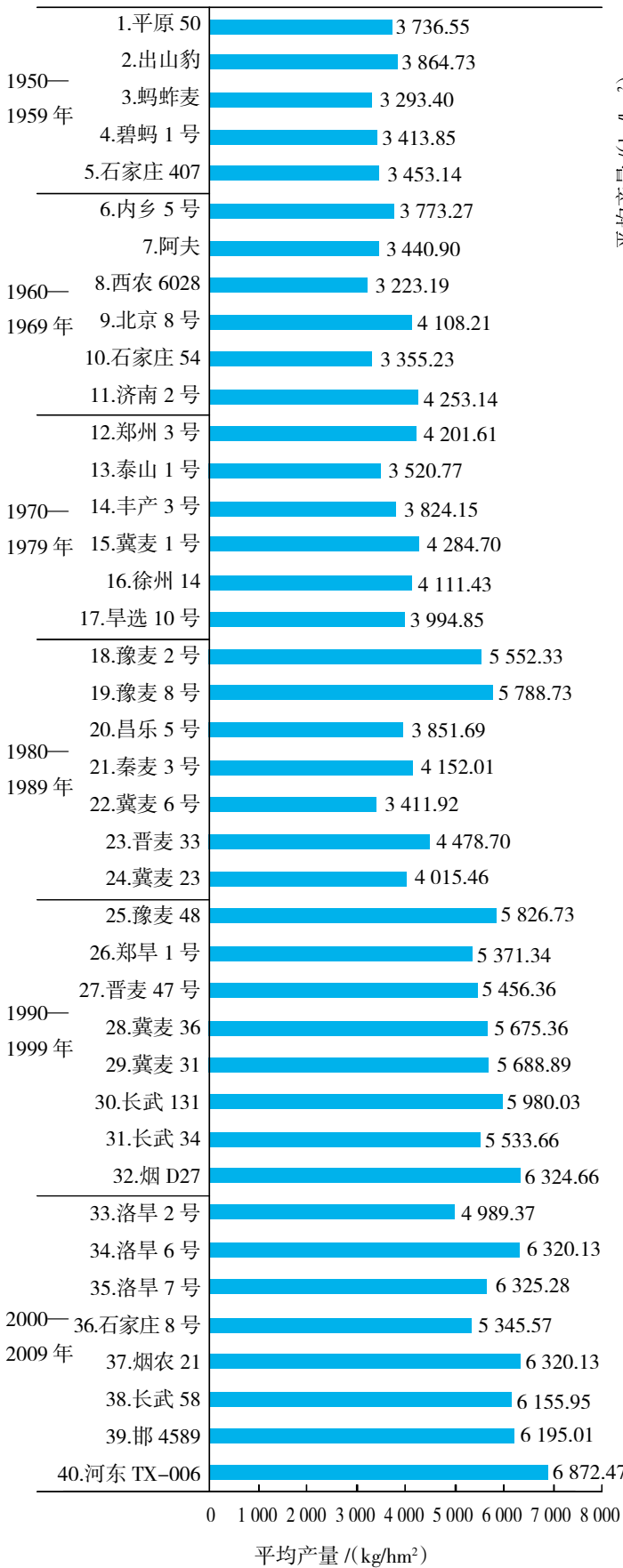


图3 不同年代间各小麦品种平均产量

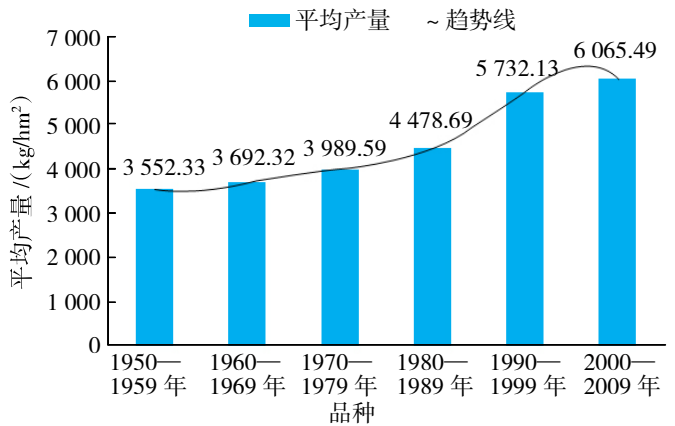


图4 平均产量变化趋势

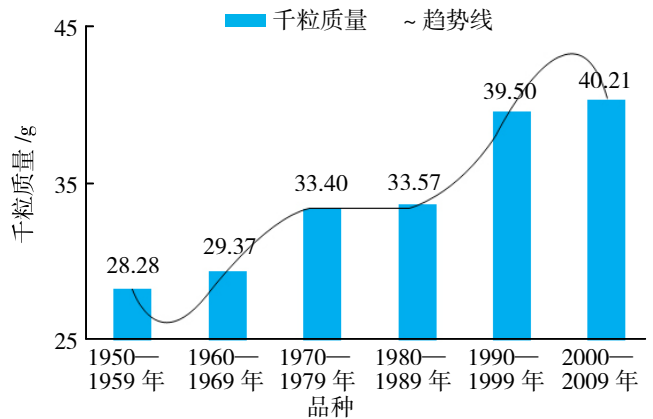


图5 千粒质量变化趋势

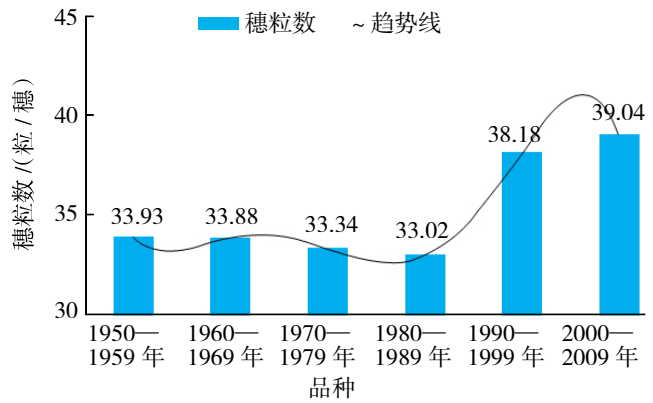


图6 穗粒数变化趋势

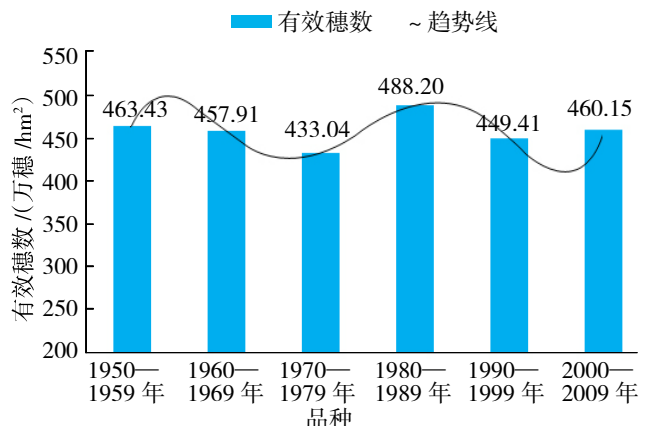


图7 有效穗数变化趋势

2.3 60年其他性状的差异分析

株高的变化则呈阶梯式降低趋势,到1990年代后降低趋势趋于平稳。由1950年代的108.09 cm逐渐降低到21世纪初(2000—2009年)的78.11 cm,

下降近30 cm,降低27.74%(图8)。株高显著降低,在于株高构成上基部节间明显缩短,使得品种的抗倒性显著增强,这与产量水平的提高和不断满足机械化收割的需求一致。

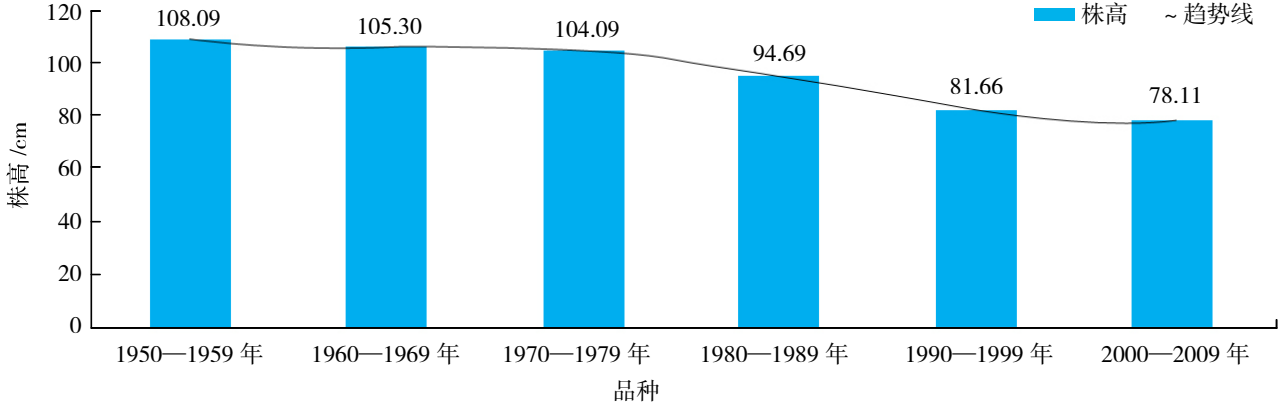


图8 株高变化趋势

穗长的变化整体呈上升的趋势,在1980年代出现小幅度的波动,可能与选择的品种有关,穗长由1950年代的7.26 cm增加到21世纪初(2000—2009年)的8.56 cm,增加了1.30 cm(图9)。不育小穗数稳定在3.0个/穗左右,年代间相对比较平稳,差异不大(图10)。可育小穗数在1950—1980年代稳定在16.3个/穗左右,1980年代后不断增加至

21世纪初(2000—2009年)的17.95个/穗,增加了近2个/穗(图11)。单株生物产量呈逐年上升的趋势,1980年代以前小幅度增加,1980年代以后上升幅度明显。单株生物产量由1950年代的15.02 g上升到21世纪初(2000—2009年)的19.43 g,增加29.36%(图12),单株生物产量的增加,为抗旱高产奠定了基础。

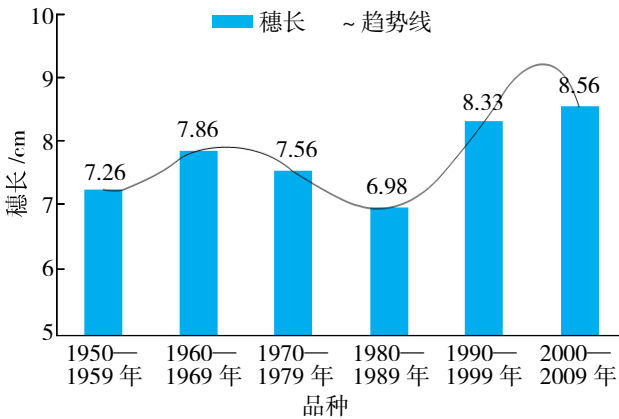


图9 穗长变化趋势

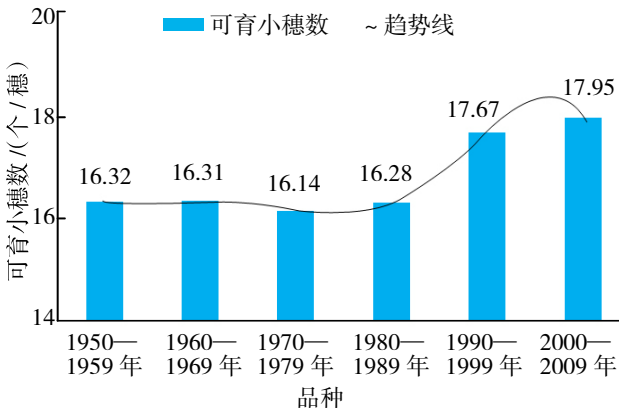
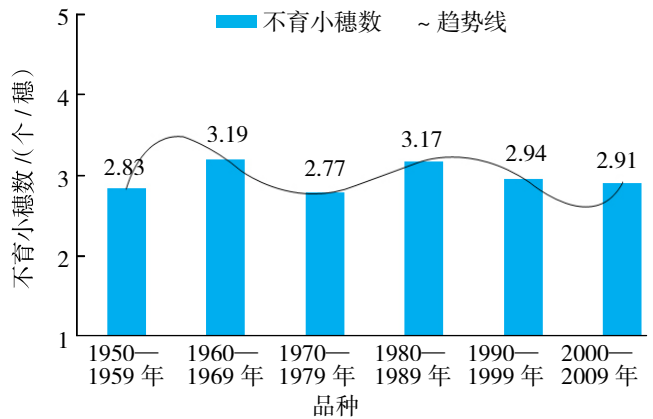


图11 可育小穗数变化趋势

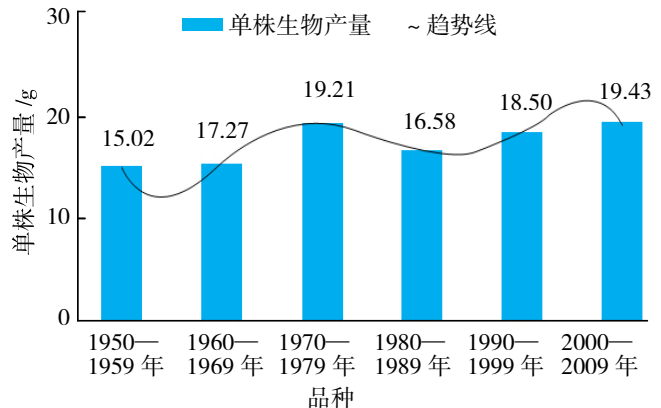


图12 单株生物产量变化趋势

### 2.4 各性状遗传变异系数分析

由表2所示,试验各性状的遗传变异系数揭示了最近60年来黄淮冬麦区旱地小麦品种产量结构与产量性状变异状况,产量结构与产量性状变异情况为穗产量>穗质量>平均产量>不育小穗数>单株生物产量>单株成穗数>千粒质量>穗粒数>株高>穗长>可育小穗数。说明这60年随着气候变化和农业生产栽培方式的变化,导致产量结构和产量性状发生了不同程度的变化;穗产量、穗质量、平均产量、不育小穗数、单株生物产量、有效穗数和千粒质量变异系数较大,而穗长、可育小穗数变异系数相对较小。

表2 小麦各性状的遗传变异系数

调查性状	变异系数/%		
	2021—2022年	2022—2023年	平均值
X1	22.56	15.42	18.99
X2	11.23	9.81	10.52
X3	23.17	23.52	23.34
X4	19.98	14.10	17.04
X5	25.98	23.96	24.97
X6	11.46	12.41	11.94
X7	25.67	31.81	28.74
X8	28.79	29.01	28.90
X9	22.03	22.44	22.24
X10	16.73	18.15	17.44
X11	18.31	15.70	17.01
X12	25.99	31.43	28.71
Y	17.97	36.70	27.34

### 2.5 农艺性状相关性分析

为了客观评价不同年代品种育种改良过程中主要性状对产量的重要性,对株高、千粒质量、穗粒数、成穗数等性状与产量的相互作用进行相关分析,结果(表3)表明,在旱地小麦品种的更新进化过程中,穗粒数(0.461<sup>\*\*</sup>)、千粒质量(0.707<sup>\*\*</sup>)、有效穗数(0.237<sup>\*\*</sup>)、可育小穗数(0.488<sup>\*\*</sup>)、穗长(0.395<sup>\*\*</sup>)、穗质量(0.633<sup>\*\*</sup>)、穗产量(0.770<sup>\*\*</sup>)、抗旱指数(0.298<sup>\*\*</sup>)与品种产量呈极显著正相关。单株生物产量(0.192<sup>\*\*</sup>)与产量呈显著正相关。株高(-0.724<sup>\*\*</sup>)、单株成穗数(-0.266<sup>\*\*</sup>)与产量呈极显著负相关。单株穗数与千粒质量(-0.245<sup>\*\*</sup>)呈极显著负相关,穗粒数也与单株穗数(-0.376<sup>\*\*</sup>)呈极显著负相关,但有效穗数与单株穗数(0.205<sup>\*</sup>)呈显著正相关,说明小麦产量三因素需要协调才能高产。可育小穗数(0.252<sup>\*\*</sup>)和穗产量(0.237<sup>\*\*</sup>)与抗旱指数呈极显著正相关,穗粒数(0.186<sup>\*</sup>)和千粒质量(0.196<sup>\*</sup>)与抗旱指数呈显著正相关。

综合以上小麦性状相关分析及农艺性状演化规律,在人工选育与气候变化自然选择的共同驱动下,小麦高产育种可采取“稳穗增粒提重”策略,即在保持较高有效穗数的前提下,协同提升穗粒数与千粒质量。同时,应着重筛选穗部结实性好、籽粒饱满度高且抗旱性优异的材料,以实现小麦品种产量的突破性增长。

表3 不同年代小麦品种农艺性状与产量的相关关系

性状	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Y
X1	1												
X2	-0.362 <sup>**</sup>	1											
X3	0.055	-0.014	1										
X4	-0.376 <sup>**</sup>	0.868 <sup>**</sup>	-0.086	1									
X5	0.205 <sup>*</sup>	-0.271 <sup>**</sup>	0.273 <sup>**</sup>	-0.430 <sup>**</sup>	1								
X6	-0.265 <sup>**</sup>	0.480 <sup>**</sup>	-0.021	0.468 <sup>**</sup>	-0.406 <sup>**</sup>	1							
X7	-0.390 <sup>**</sup>	0.664 <sup>**</sup>	-0.085	0.680 <sup>**</sup>	-0.403 <sup>**</sup>	0.617 <sup>**</sup>	1						
X8	-0.385 <sup>**</sup>	0.702 <sup>**</sup>	-0.149	0.719 <sup>**</sup>	-0.319 <sup>**</sup>	0.601 <sup>**</sup>	0.872 <sup>**</sup>	1					
X9	0.084	0.155	-0.058	0.163	-0.129	0.118	0.217 <sup>**</sup>	0.256 <sup>**</sup>	1				
X10	-0.245 <sup>**</sup>	0.211 <sup>*</sup>	-0.142	0.239 <sup>**</sup>	-0.278 <sup>**</sup>	0.503 <sup>**</sup>	0.664 <sup>**</sup>	0.735 <sup>**</sup>	0.237 <sup>**</sup>	1			
X11	0.121	-0.363 <sup>**</sup>	-0.068	-0.366 <sup>**</sup>	-0.122	-0.235 <sup>*</sup>	-0.503 <sup>**</sup>	-0.601 <sup>**</sup>	-0.154	-0.501 <sup>**</sup>	1		
X12	-0.082	0.252 <sup>**</sup>	-0.067	0.186 <sup>*</sup>	0.118	0.023	0.128	0.237 <sup>**</sup>	0.008	0.196 <sup>*</sup>	-0.096	1	
Y	-0.266 <sup>**</sup>	0.488 <sup>**</sup>	0.022	0.461 <sup>**</sup>	0.237 <sup>**</sup>	0.395 <sup>**</sup>	0.633 <sup>**</sup>	0.770 <sup>**</sup>	0.192 <sup>*</sup>	0.707 <sup>**</sup>	-0.724 <sup>**</sup>	0.298 <sup>**</sup>	1

注:\*表示显著相关( $P < 0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。

2.6 农艺性状对产量的通径分析

尽管简单线性相关分析能反映各农艺性状与产量间的关联强度,却难以阐明其内在调控机制。因此,本研究采用通径分析(path analysis)结合多元逐步回归方法,量化各性状对产量的直接作用与间接贡献,以精准识别影响产量形成的关键调控性状。表4表明,在黄淮冬麦区旱作小麦育种选择中,农艺性状对产量性状直接贡献大小依次为千粒质量(0.585 1) > 有效穗数(0.573 3) > 穗粒数(0.334 3) > 穗产量(0.192 1) > 株高(1-0.118 0) > 穗长(0.058 5) > 穗质量(0.058 4) > 可育小穗数(0.055 8) > 抗旱指数(0.036 0) > 单株生物产量(1-0.004 9)。表明有效穗数、穗粒数、千粒质量和穗产量对产量直接贡献较大且为正效应关系,株高对产量直接贡献较大且为负效应关系;且穗粒数、千粒质量、有效穗数和穗产量对产量表现为极显著正相关关系,进而表明这5个性状的改良与提高决定了品种单位面积产量的增加。

可育小穗数、穗长和穗质量对产量的直接作用是正向效应,3个性状均与产量呈极显著正相关。抗

旱指数对产量的直接作用是正向效应,直接通径系数较小,但抗旱指数与产量呈极显著正相关,可能与试验期间小麦生育期降水量有直接的关系。2018—2020年洛阳小麦生育期适逢风调雨顺的年景,更有利于发挥品种本身的丰产潜力。株高和单株生物产量对产量的直接作用是负向效应,但单株生物产量与平均产量呈显著正相关,株高与平均产量呈极显著负相关。从选取的品种来看,主要是因为品种株高稍高,往往抗旱性较好,有益于获得较大的生物量,但抗倒性较差,如果在灌浆期发生倒伏,将会影响小麦灌浆,使品种的产量大幅度降低。

由此可见,在旱地小麦育种过程中,不仅要重视有效穗数、千粒质量和穗粒数,使产量构成因素结构趋于合理,而且要重视其他性状能适应未来气候变化。株高要控制在合理的范围内(80 cm左右),能够有效应对气候变化,以免极端天气例如洪涝、大风、暴雨等易引起倒伏从而导致大幅度减产。同时,要选择抗旱节水、结实性好、抗倒春寒、抗病性强、耐后期高温的品种,从而提高旱地小麦的产量。

表4 不同年代不同小麦品种农艺性状对平均产量的通径分析

作用因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数									
			X2	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
X2	0.488**	0.055 8		0.271 9	-0.138 8	0.023 5	0.034 8	0.118 4	-0.001 1	0.095 9	0.034 4	-0.007 8
X4	0.461**	0.334 3	0.041 2		-0.253 8	0.023 8	0.034 7	0.130 2	-0.000 7	0.148 4	0.034 9	-0.006 8
X5	0.237**	0.573 3	-0.012 3	-0.129 7		-0.024 5	-0.023 1	-0.056 5	0.000 6	-0.150 0	0.014 1	-0.004 5
X6	0.395**	0.058 5	0.020 4	0.133 5	-0.233 0		0.026 4	0.089 8	-0.000 2	0.203 3	0.014 8	-0.001 1
X7	0.633**	0.058 4	0.031 0	0.207 5	-0.228 6	0.027 6		0.155 7	-0.001 0	0.355 1	0.052 4	-0.004 3
X8	0.770**	0.192 1	0.034 9	0.226 5	-0.200 9	0.029 0	0.045 4		-0.001 4	0.435 7	0.061 6	-0.009 9
X9	0.192*	-0.004 9	0.012 2	0.046 4	-0.070 1	0.002 7	0.011 5	0.055 2		0.148 9	0.014 9	-0.000 9
X10	0.707**	0.585 1	0.009 2	0.084 8	-0.166 6	0.021 9	0.036 4	0.131 6	-0.001 3		0.051 2	-0.007 4
X11	-0.724**	-0.118 0	-0.017 0	-0.108 9	-0.075 1	-0.008 3	-0.024 0	-0.102 9	0.000 7	-0.277 0		0.002 9
X12	0.298**	0.036 0	0.011 3	0.062 3	0.074 3	0.001 8	0.007 3	0.046 3	-0.000 1	0.113 0	0.009 1	

注: X1 和 X3 在软件统计中因性状贡献率低被自动剔除。复相关系数  $R = 0.955\ 341$ ; 决定系数  $R^2 = 0.912\ 676$ ; 剩余通径系数 = 0.295 51。\*、\*\* 分别表示显著相关、极显著相关。

3 讨论

面对以气候变暖、干旱程度加剧、降水量分布不均、各种病害频发为主要特征的气候变化事实,抗旱小麦育种选择上需重新调整以满足和适应农业生产栽培和未来气候的变化<sup>[24]</sup>。提高品种应对气

候变化和环境变化的高抗逆性及生产适应性将是育种家们追求和选择的目标。通过研究黄淮麦区旱作小麦品种应对气候变化和生产栽培模式的演化规律,对于保证国家粮食安全和增加旱地农业可持续发展具有重要的现实意义。

本研究发现,随着气候变化,早期品种在适应

性上显著不足,株高、有效穗数、千粒质量等不能满足实际生产和气候变暖的要求。水地品种在旱作麦区适应性差且不具备旱作麦区生长要素,种植风险极大,加上丘陵旱地等旱作麦区生产实际需求大,旱地小麦育种的遗传更新显得尤为重要!必须有新的突破和创新,来满足和适应新气候、新形势的发展。为此黄淮冬麦区旱地小麦产量性状的演变规律能够反映旱地小麦育种方向的不断进化,为品种大面积示范和更新换代提供理论依据。同时结合旱作麦区生产实际,适时进行育种创新和品种更替,以此应对生产和气候条件变化带来的影响。对黄淮冬麦区1950年代以来近60年40个旱地推广面积较大的小麦品种的抗旱性研究表明,其抗旱指数表现出先降低后缓慢回升的趋势,1950年代抗旱指数为1.033,抗旱性相对较强,当时的品种大多株高偏高,茎秆较细,落黄好,籽粒饱满,但千粒质量偏低;1960、1970年代品种更替中小麦抗旱性有所下降,这与特定的时期有关,当时育种和生产条件落后,小麦产量水平低下,为解决温饱问题主攻产量,从而忽视了小麦抗旱性的选择;1980年代以后,随着气候变暖、干旱程度加剧,以往的选择局限性加剧,育种与生产实际脱节严重,育种家对抗旱性的选择得到重视,小麦抗旱性开始逐步回升,抗旱性品种突显,在抗旱与高产上得以协调,旱作麦区产量明显提高。因此,加强小麦抗旱性研究,使抗旱性和丰产性协同改良是旱地小麦育种努力的方向。

本研究发现,60年来黄淮冬麦区旱地小麦的产量不断提高,21世纪初(2000—2009年)的小麦产量比1950年代的产量最高提高70.7%左右;株高随气候变暖逐渐降低,基部节间缩短,品种的抗倒性显著增强。前人研究表明,旱地小麦品种株高和产量的相关性较为密切,旱作麦区稳定的株高在一定范围内将有利于获得较高的生物产量,从而进一步提高籽粒产量<sup>[25]</sup>。在干旱胁迫环境下,株高降低幅度大小往往可以作为判别小麦抗旱性强弱的直观指标<sup>[26]</sup>。抗旱指数对产量的正向影响是真实且显著的,但是这种影响绝大部分是通过影响其他中间变量间接实现的。通径分析清晰地揭示了这种直接作用和间接作用的差异,强调了抗旱性主要通过改变其他性状来最终影响产量的路径。在气候变化的环境下,因干旱胁迫而能够保持较高的株高,将大大有利于增进小麦籽粒灌浆效果和有效增加粒质量,从而减少因气候变化造成小麦减产,保证粮食稳产<sup>[27]</sup>。结合生产需求、气候变化和肥力水平的提高,株高

高的品种容易倒伏而造成减产,从而形成了旱地小麦育种株高矮化的趋势。

小麦育种产量指标是育种家不断追求的主要遗传改良目标<sup>[28-29]</sup>。随着小麦品种的更新换代,品种性状的遗传改良不断发生改变,增产潜力不断提高<sup>[27,30-31]</sup>。应对气候变暖,在育种选择上降低株高、增加千粒质量、提高穗粒数,同时对抗性进行选择,可对黄淮冬麦区小麦生长发育和提高产量产生较大的影响。在育种选择中选育生育期较短但生殖生长阶段较长且千粒质量大的品种,是调控和应对未来气候变化的品种遗传改良方向<sup>[32]</sup>,这与本研究结果相同。周吉等认为有效穗数较多的抗旱节水品种,产量也较高<sup>[33]</sup>。吴秀亭等也研究认为在黄淮冬麦区旱作小麦千粒质量和穗粒数均有增加的选择趋势<sup>[30]</sup>。千粒质量、穗粒数和有效穗数作为产量构成三要素,三者之间如何协调发展是小麦能否获得高产的关键。应对气候变化,适应黄淮冬麦区旱作麦区,以有效穗数为基础,协调提高穗粒数和千粒质量,兼顾抗逆性选择,将是今后旱地小麦取得高产的重要途径。

性状遗传变异系数量化了这一性状在品种内的遗传改良潜力,通过将其与环境变异系数进行对比,可有效评估该性状选择的可靠性<sup>[34]</sup>。研究结果的差异与试验选择的地区和品种的不同有很大关系,本文利用黄淮冬麦区旱地小麦品种,以产量性状和遗传选择育种目标来分析旱作麦区冬小麦如何应对气候变化,研究结果可为旱地小麦育种应对气候变化提供参考价值。

#### 4 结论

自1950年代以来,黄淮冬麦区旱地小麦产量总体呈现逐渐增加的趋势,1990年代后达到较高水平;在农艺性状上,有效穗数、穗粒数和千粒质量大趋势均呈稳步增加,抗旱指数先下降后增加,株高呈不断降低趋势,矮秆抗倒性增强。在对产量贡献上,有效穗数和千粒质量起主要作用,其次是穗粒数和株高。由此可见,针对黄淮旱作麦区,在应对气候变化的背景下,如何适应干旱,加强御旱能力,提高水分利用效率,在有限的水资源环境下,选育抗旱、高产、节水性好,株高80 cm左右,抗寒性好,抗病,抗后期干热风能力强的品种,是今后旱作麦区品种改良的主要方向。抗逆性的选择是辅助性指标,产量的提高仍以产量三因素为主体,保证有效穗

数,协调提高小麦穗粒数和千粒质量,是小麦品种获得高产的通用密码。应对当前生产与气候变化,旱地小麦育种应以抗旱性为目标,以高产为方向,将抗旱性和丰产性协同提升是旱地小麦育种的关键。

#### 参考文献:

- [1] 王亚飞,李世景,徐 萍,等. 黄淮和长江中下游冬麦区小麦品种(系)农艺性状及其聚类分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):395-404.
- [2] ORTIZ R,SAYRE K D,GOVAERTS B,et al. Climate change:can wheat beat the heat[J]. *Agriculture,Ecosystems & Environment*,2008,126(1/2):46-58.
- [3] LIU Y,WANG E L,YANG X G,et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain,since 1980s[J]. *Global Change Biology*,2010,16(8):2287-2299.
- [4] 卫云宗,刘新月,张久刚,等. 小麦生产的生态定位及发展策略[J]. 农业现代化研究,2003,24(5):392-395.
- [5] 赵俊芳,谢鸿飞,杨嘉琪,等. 1981—2020年黄淮海冬小麦干旱时空分异规律及演变趋势[J]. 生态学杂志,2024,43(10):3104-3112.
- [6] SUN Q H,MIAO C Y,HANEL M,et al. Global heat stress on health, wildfires,and agricultural crops under different levels of climate warming[J]. *Environment International*,2019,128:125-136.
- [7] COLLETTE L,HODGKIN T,KASSAM A H,et al. Save and grow:a policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production[R]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations,2011,112:95-101.
- [8] 赵海燕,张文千,邹旭恺,等. 气候变化背景下中国农业干旱时空变化特征分析[J]. 中国农业气象,2021,42(1):69-79.
- [9] 姚慧敏,张凤荣,鞠正山. 黄淮海平原区耕地变化对粮食生产能力的影 响[J]. 农村经济,2004(10):31-33.
- [10] 吴秀婷,张正斌,徐 萍,等. 黄淮小麦农艺性状演变趋势[J]. 中国农业科学,2013,46(18):3930-3938.
- [11] 宋璐杏,张闪闪,李 玟,等. 小麦高代系的抗旱性状筛选与抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(1):14-22.
- [12] 山 仑. 旱地农业发展中若干生物学问题的探讨[J]. 中国农业科技导报,2009,11(2):5-9.
- [13] TURNER N C. Further progress in crop water relation [J]. *Advances in Agronomy*,1996,58:293-338.
- [14] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:754-780.
- [15] 孟 雨,田文仲,温鹏飞,等. 基于不同发育阶段协同的小麦品种抗旱性综合评判[J]. 作物学报,2023,49(2):570-582.
- [16] 高 歌,李 莹,陈 涛,等. 2004—2019年中国干旱多承灾体灾损风险特征评估[J]. 气象,2023,49(5):611-623.
- [17] 王守荣,达庆利,黄凤喜. 中国农业受灾与成灾面积预测研究[J]. 气象学报,2003,61(1):106-115.
- [18] 杨艳颖,毛克彪,韩秀珍,等. 1949—2016年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响[J]. 中国农业信息,2018,30(5):76-90.
- [19] 陈逸骁,岳思好,夏雯雯. 中国干旱灾害的时空变化及其与直接经济损失的关联性研究[J]. 干旱气象,2024,42(4):485-497.
- [20] 赵海燕,张文千,邹旭恺,等. 气候变化背景下中国农业干旱时空变化特征分析[J]. 中国农业气象,2021,42(1):69-79.
- [21] 闫金龙,张俊灵,张东旭,等. 旱作雨养条件下小麦农艺性状与产量及抗旱性的关系[J]. 山西农业科学,2019,47(10):1766-1769,1777.
- [22] 陈卫国,张 政,史雨刚,等. 211份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. 作物杂志,2020(4):53-63.
- [23] 王优信,延 荣,蔺明月,等. 冀中北小麦品种抗旱性筛选研究[J]. 植物遗传资源学报,2021,22(1):74-82.
- [24] 刘新月,裴 磊,卫云宗,等. 1986—2014年临汾降水变化及对旱地小麦农艺性状的影响[J]. 麦类作物学报,2016,36(7):933-938.
- [25] 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):2631-2640.
- [26] 高辉明,张正斌,徐 萍,等. 2001—2009年中国北部冬小麦生育期和产量变化[J]. 中国农业科学,2013,46(11):2201-2210.
- [27] 李亚亚. 旱地小麦个体性状与单株产量的相关分析[J]. 河南农业,2019(7):45-46.
- [28] 郭 瑞,李正玲,张 煜,等. 30a来河南省不同类型小麦品种产量和农艺性状演变规律[J]. 河南农业科学,2018,47(4):15-20.
- [29] 杨洪强,田文仲,吴少辉,等. 1982—2010年河南省旱地小麦品种主要农艺性状的遗传演变规律[J]. 河南农业科学,2014,43(5):38-41.
- [30] 郭凤芝,林 坤,葛振勇,等. 2001—2017年山东省审定小麦高产品种农艺、产量和品质性状演变分析[J]. 山东农业科学,2019,51(3):16-23.
- [31] 曹颖妮,余大杰,赵光华,等. 2006—2016年河南省小麦区域试验品种(系)的品质性状分析[J]. 麦类作物学报,2018,38(8):893-899.
- [32] 张丽英,张正斌,徐 萍,等. 黄淮小麦农艺性状进化及对产量性状调控机理的分析[J]. 中国农业科学 2014,47(5):1013-1028.
- [33] 周 吉,徐 萍,李国强,等. 不同水旱地小麦品种聚类分析及其利用模式研究[J]. 麦类作物学报,2009,29(5):809-813.
- [34] 伍维模,李世清. 小麦品种演变过程中性状遗传改良规律综述[J]. 塔里木大学学报,2006,18(1):43-47.

# Genetic Improvement Analysis of Different Ecotypes of Dryland Wheat Breeding in Huanghuai Winter Wheat Region

FENG Weisen, ZHANG Xuepin, YANG Li, DING Zhiqiang, ZHAO Yan, GAO Haitao, WU Shaohui  
(Luoyang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Luoyang 471022, China)

**Abstract:** Wheat production and breeding in China are facing the huge impact of climate change. In order to study the regulation mechanism of the agronomic traits of dryland wheat varieties in the Huang Huai winter wheat region of China on adapting to climate change, 40 wheat varieties with a large area of dryland promotion in the Huanghuai Winter Wheat Region from 1950 to 2009 were used as experimental materials to plant in Huanghuai Winter Wheat Region of Luoyang, Henan Province. After harvest, the average yield, the number of ears per plant, the number of fertile spikelets, the number of sterile spikelets per ear, the number of grains per ear, the number of effective panicles, ear length, ear weight, ear yield, biological yield per plant, 1 000-grain weight, plant height, and drought resistance index were investigated. The variation patterns of yield traits, the correlation between yield and agronomic traits, and the contribution rate of agronomic traits to yield were analyzed. The results showed that with inter decadal changes, the drought resistance of dryland wheat varieties in Huanghuai Winter Wheat Region first decreased and then rebounded, while plant height significantly decreased. The production potential continues to rise, with the largest increase of 70.75% compared to the 1950s in the 2000s across different eras. There is also an increasing trend between different eras, with relatively stable changes in production in the 1950s and 1960s (an increase of 3.94%), the larger increase in production in the 1980s and 1990s (an increase of 27.99%). The thousand-grain weight, number of grains per spike, and number of effective spikes all showed an increasing trend, with the increase range being thousand grain weight > number of effective spikes > number of grains per spike. The yield is extremely significantly positively correlated with thousand-grain weight ( $0.707^{**}$ ), grain number per spike ( $0.461^{**}$ ), effective spike number ( $0.237^{**}$ ), fertile spikelet number ( $0.488^{**}$ ), spike length ( $0.395^{**}$ ), spike weight ( $0.633^{**}$ ), spike yield ( $0.770^{**}$ ), and drought resistance index ( $0.298^{**}$ ). The yield contribution values of thousand-grain weight, number of grains per ear, and effective number of ears are all significant and have a positive effect, while plant height shows a negative effect. The agronomic traits of dryland wheat in Huanghuai Winter Wheat Region are strongly influenced by climate change. Breeding drought resistant varieties with moderate plant height, strong drought and lodging resistance, moderate number of effective panicles, more grains per ear, and larger thousand-grain weight is a key improvement direction for dryland wheat breeding in Huanghuai Winter Wheat Region in response to future climate change.

**Key Words:** Huanghuai Winter Wheat Region; Different ecological types; Dryland wheat varieties; Breeding traits; Genetic improvement

## 本刊加入有关数据库的特别声明

为了适应我国期刊信息化建设的需要和扩大作者学术交流渠道,实现期刊编辑、出版工作的网络化与数字化,提高作者所发表论文的被引频次与影响力,本刊已加入《中国学术期刊(光盘)》、“中国期刊网”“万方数据—数字化期刊群”、重庆维普“中文期刊数据库”、超星期刊“域出版”平台和国家科技学术期刊开放平台等。作者无需另外支付网络编审费。作者著作权使用费与本刊稿酬由本刊编辑部一次性给付作者。如作者不同意编入上述数据库,请务必提供书面说明。所刊载文献被以各种形式转载时请注明来源于本刊。

《大麦与谷类科学》杂志编辑部