文章编号:1000-7601(2025)05-0087-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.09

北疆春玉米籽粒脱水动态及其对产量与机械粒收质量的影响

周先林[1,3],薛 军[1,2],黄兆福[1],王克如[1,2],李少昆[1,2],朱海勇[4]

(1. 中国农业科学院西部农业研究中心,新疆 昌吉 831100;2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室,北京 100081;3. 新疆大学生态与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830046;4. 广西民族大学相思湖学院,广西 南宁 530008)

摘 要:以北疆地区 34 个不同熟期的玉米品种为试验材料,通过系统测定籽粒脱水动态特征、产量及机械粒收质量指标,深入分析了籽粒含水率与积温、产量及粒收质量的关系。结果表明,品种间生理成熟期的籽粒含水率存在显著差异,平均值为 27.33%,变幅 24.48~30.25%,其中‘郑单 958’的籽粒含水率最高(30.25%),‘KX2030’的籽粒含水率最低(24.48%);构建的籽粒含水率与积温回归模型($y=90/(1+x/992.201)^{1.895}$,$R^2=0.961$)可准确预测含水率动态变化。供试品种平均产量为 12 300.59 kg·hm^{-2},其中‘先玉 1330’表现出较好的脱水特性(总脱水速率 0.040 %·℃$^{-1}$·d^{-1})和最高产量(16 681.77 kg·hm^{-2})。籽粒含水率显著影响机械粒收质量,当含水率为 18.31%时破碎率最低(4.32%),含水率在 13.86%~22.76%范围内可满足破碎率≤5%的国标要求,当含水率低于 38.37%和 37.25%时分别可保证杂质率和产量损失率达标。通过双向平均法筛选出‘先玉 1330’、‘先单 13’、‘九圣禾 2468’和‘富尔 116’共 4 个兼具低籽粒含水率(<27.5%)、高脱水速率(>0.038 %·℃$^{-1}$·d^{-1})和高产(>13 500 kg·hm^{-2})特性的适机收品种。

关键词:春玉米;籽粒脱水;机械粒收;品种筛选;产量

中图分类号:S513 **文献标志码**:A

Dynamics of grain desiccation in spring maize and its impacts on yield and mechanical grain harvest quality in Northern Xinjiang

ZHOU Xianlin[1,3], XUE Jun[1,2], HUANG Zhaofu[1], WANG Keru[1,2], LI Shaokun[1,2], ZHU Haiyong[4]

(1. *Institute of Western Agricultural, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji, Xinjiang* 831100, *China*; 2. *Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100081, *China*; 3. *College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang* 830046, *China*; 4. *Xiangsihu College of Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi* 530008, *China*)

Abstract: Using 34 maize varieties of different maturity periods in Northern Xinjiang as experimental materials, this study systematically measured grain desiccation dynamics, yield, and mechanical harvest quality indicators to analyze the relationships among grain moisture content, accumulated temperature, yield, and harvest quality. The results showed significant varietal differences in grain moisture content at physiological maturity, averaging 27.33%, ranging from 24.48% to 30.25%, with ‘Zhengdan 958’ having the highest moisture content (30.25%) and ‘KX2030’ the lowest (24.48%). The developed grain moisture-accumulated temperature regression model ($y=90/(1+x/992.201)^{1.895}$, $R^2=0.961$) accurately predicted moisture dynamics. The average yield across varieties was 12 300.59 kg·hm^{-2}, with ‘Xianyu 1330’ exhibiting superior desiccation characteristics (total desiccation rate was 0.040 %·℃$^{-1}$·d^{-1}) and the highest yield (16 681.77 kg·hm^{-2}). Grain moisture content significantly affected harvest quality. Minimum broken rate (4.32%) occurred at moisture content of 18.31%, with the 13.86%~22.76% range meeting national standards (broken rate ≤5%). Impurity and yield loss rates met standards when grain moisture con-

收稿日期:2024-11-29 **修回日期**:2025-01-15

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02040);中国农业科学院农业科技创新工程项目(2025)

作者简介:周先林(1985-),男,四川简阳人,博士,高级农艺师,主要从事作物高产栽培与生态协同研究。E-mail:zhouxianlin@caas.cn

通信作者:李少昆(1963-),男,新疆石河子人,研究员,主要从事玉米高产栽培生理研究。E-mail:lishaokun@caas.cn

朱海勇(1981-),男,江西兴国人,副研究员,主要从事作物栽培理论与技术研究。E-mail:tjtbeazhy@163.com

tent was below 38.37% and 37.25%, respectively. Four high-performing varieties ('Xianyu 1330', 'Xiandan 13', "Jiushenghe 2468" and 'Fuer 116') with low grain moisture content (<27.5%), high desiccation rate (>0.038 %·℃$^{-1}$·d^{-1}), and high yield (>13 500 kg·hm^{-2}) were identified using bi-directional averaging.

Keywords: spring maize; grain dehydration; mechanical harvesting; variety screening; yield

玉米作为我国重要的粮食作物之一,在国家粮食安全中有着举足轻重的地位[1]。籽粒含水率(grain moisture content, GMC)是评估玉米成熟度的关键指标,其不仅决定了适宜的收获时机,还直接影响玉米的储存与加工品质[2-3]。随着现代农业机械化收获技术的发展,玉米籽粒脱水特性在品种选育和种植管理中的重要性日益凸显[4]。

研究表明,籽粒脱水速率是一个受遗传背景、气候条件(如温度和湿度)以及栽培管理措施(如灌溉和施肥)等多种因素共同作用的复杂性状[3]。其中,遗传因素在品种间籽粒灌浆和脱水特性的差异形成中可能起着主导作用[5],这进一步强调了深入分析籽粒脱水速率以及探寻其快速测定方法在品种选育工作中的关键意义[6]。温度和湿度的变化也会对籽粒脱水速率产生显著影响[7]。针对黄淮海地区的研究表明,主推夏播玉米品种的脱水特性存在显著基因型差异,进一步印证了遗传背景对籽粒脱水速率的调控作用[8]。不同品种在成熟期的籽粒含水量及脱水速率上的差异表明,筛选具有优良脱水特性的品种是提高玉米收获效率的关键[9-10]。

针对玉米籽粒脱水及机械化收获的研究显示,选择适宜的品种对于提高脱水效率至关重要[11]。籽粒含水率的遗传效应分析有助于理解品种间的差异,不同发育阶段籽粒脱水速率的遗传分析有助于揭示其背后的遗传机制[12-13]。研究表明,合理的灌溉措施能够改善籽粒脱水特性,间作模式下不同熟期玉米品种的籽粒灌浆、脱水特性及产量也受到显著影响[7]。对玉米籽粒脱水特点及适宜收获期的研究发现,选择合适的收获时期对于保证籽粒品质至关重要[14-15]。

前人围绕籽粒脱水特性及机械粒收适应性展开了诸多探索,但多侧重于分析籽粒含水率对玉米收获及储存的影响,或单一探讨产量与品种特性之间的关联,且试验品种选择范围不够广泛[16-17]。基于此,本文以北疆地区34个春玉米品种为研究对象,通过系统测定不同品种籽粒含水率,深入分析其脱水特性及其与机械粒收质量、产量的关系,进而筛选低籽粒含水率且高产的优良品种,以期为北疆地区的玉米生产提供针对性的品种选择建议,同时为玉米品种改良提供重要的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2017—2018年在中国农业科学院昌吉综合试验基地(44°26′N,87°34′E)进行。该地区属于典型的大陆性干旱气候,昼夜温差大,夏季高温,冬季寒冷。试验地土壤为壤土,容重1.45 g·cm^{-3},肥力均匀。两年试验期间(4—10月)有效积温分别为3 784.1℃和3 836.6℃(图1),降水量分别为145.5 mm和92.8 mm(图2)。

1.2 试验材料

试验选用34个当地主栽或适宜北疆春播的玉米品种,其中中晚熟品种23个,生育期介于126~136 d;中熟品种7个,生育期介于116~125 d;中早熟品种4个,生育期介于96~111 d。品种类型及生育期信息见表1。

1.3 试验设计

试验采用大区种植方式,每个品种种植面积为667 m^2,行长100 m,行宽6 m,播种行距50 cm,种植密度97 500株·hm^{-2},共34个小区,各小区田间随机排列。玉米2017年于5月5日播种,10月2日收获;2018年于4月28日播种,9月25日收获。试验期间,按照当地农业生产标准进行灌溉、施肥、病虫害防治等管理措施。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 籽粒含水率测定 籽粒含水率采用烘干法测定。在玉米乳熟期,从各品种中随机选取具有代表性的果穗5株,每隔2 d取样1次,每次取样时间为上午9:00—11:00,剥离籽粒并记录鲜质量。随后将籽粒置于105℃恒温烘箱中烘干至恒重,记录干质量。籽粒含水率(%)=(鲜质量-干质量)/鲜质量×100%。

1.4.2 籽粒含水率变化与积温的关系模型建立 根据授粉后不同生育时期玉米百粒重测定结果,参考李璐璐[16]的方法,建立授粉后积温与籽粒含水率之间的回归关系模型。模型公式为:

$$MC = \frac{a}{\left(1 + \frac{T}{b}\right)^c} \quad (1)$$

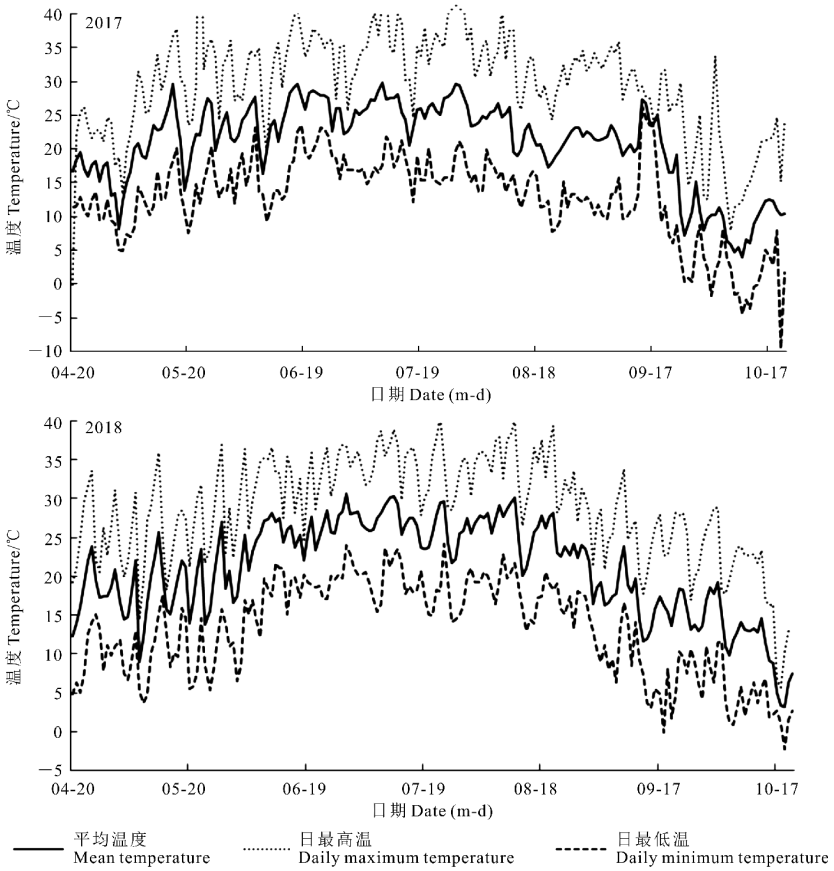

图 1　试验期间的日气温变化

Fig.1　Daily temperature variation during the experiment period

式中,a、b、c 为模型参数;T 为自变量(授粉后积温,℃ · d);MC 为因变量(籽粒含水率,%);a 为籽粒初始含水率,设定为 90%。

1.4.3　*籽粒脱水速率测定*　采用授粉初期~生理成熟期(PM)和生理成熟期~收获期两个阶段的积温数据,计算玉米籽粒脱水速率,以评估不同品种的脱水特性。具体计算公式如下:

$$\text{生理成熟前脱水速率}(\%\cdot℃^{-1}\cdot d^{-1})=\frac{\text{授粉初期籽粒含水率}-\text{生理成熟期籽粒含水率}}{\text{授粉初期}\sim\text{生理成熟期积温}} \quad (2)$$

$$\text{生理成熟后脱水速率}(\%\cdot℃^{-1}\cdot d^{-1})=\frac{\text{生理成熟期籽粒含水率}-\text{收获期籽粒含水率}}{\text{生理成熟期}\sim\text{收获期积温}} \quad (3)$$

$$\text{总脱水速率}(\%\cdot℃^{-1}\cdot d^{-1})=\frac{\text{授粉初期籽粒含水率}-\text{收获期籽粒含水率}}{\text{总积温}} \quad (4)$$

1.4.4　*籽粒破碎率、杂质率和产量损失率测定*　在机械粒收现场,随机取机仓内收获品种的籽粒样品 2 kg,将其分为籽粒和非籽粒两部分,分别称重记为 $W1$ 和 $W2$;再根据籽粒的完整性,将其分为完整籽粒和破碎籽粒,分别称重记为 $W3$ 和 $W4$,杂质率和籽粒破碎率计算公式如下:

$$\text{杂质率}(\%)=[W2/(W1+W2)]\times100 \quad (5)$$

$$\text{籽粒破碎率}(\%)=[W4/(W3+W4)]\times100 \quad (6)$$

在机械粒收地块随机选取 3 个样点,每个样点长 2 m、4 个播种幅宽,收集样点内所有的落穗和落粒,分别称重,产量损失率计算公式如下:

$$\text{产量损失率}(\%)=(\text{单位面积田间落粒重}+\text{单位面积田间落穗籽粒重})/\text{单位面积产量}\times100 \quad (7)$$

1.5　数据处理与分析

使用 Excel 2016 进行数据计算和图表绘制;使用 Cure Expert Professional 进行籽粒含水率动态变化的曲线拟合及相关参数确定;使用 SPSS 22.0 进行数据的相关分析、方差分析及多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同玉米品种生理成熟期籽粒含水率、脱水速率及产量

通过对 34 个玉米品种在生理成熟期的籽粒含水率进行分析(表 2)表明,籽粒含水率平均值为 27.33%,变化幅度为 24.48%~30.25%,品种间存在

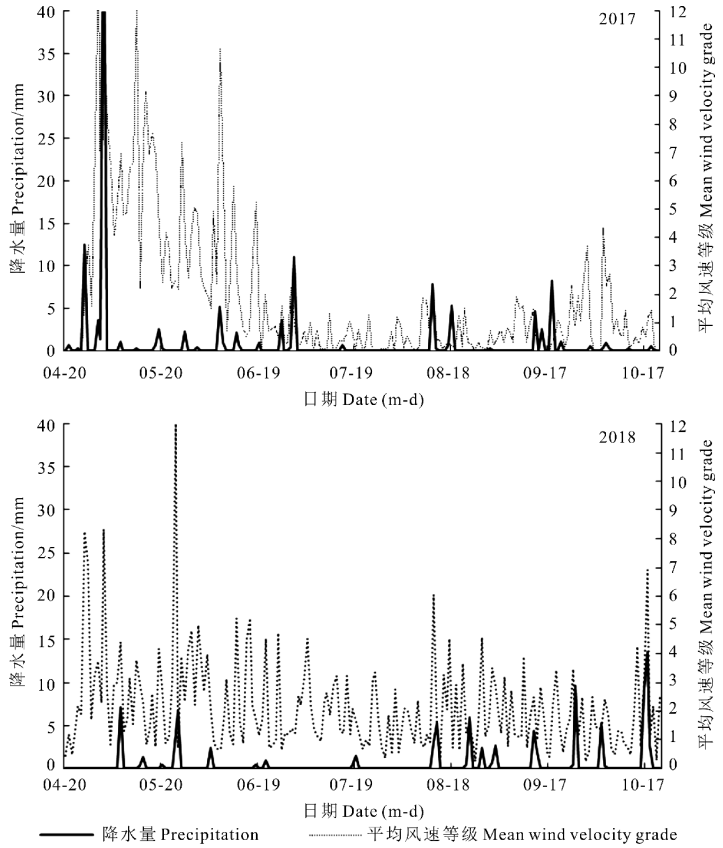

图 2 试验期间的降水量和平均风速

Fig.2 Precipitation and mean wind velocity during the experiment period

表 1 供试玉米品种信息

Table 1 Information of the tested maize varieties

品种 Variety	代码 Code	生育期/d Growing period	熟期类型 Maturity type
郑单 958 Zhengdan 958	ZD958	132	中晚熟 Medium-late maturity
辽单 585 Liaodan 585	LD585	130	
新玉 47 Xinyu 47	XY47	133	
真金 308 Zhenjin 308	ZJ308	132	
淮玉 6 Huaiyu 6	HY6	135	
东单 1331 Dongdan 1331	DD1331	135	
新玉 77 Xinyu 77	XY77	128	
先玉 1321 Xianyu 1321	XY1321	135	
泽玉 8911 Zeyu 8911	ZY8911	132	
九圣禾 2468 Jiushenghe 2468	JSH2468	133	
KX3564	KX3564	130	
九玉 MO3 Jiuyu MO3	JYM03	126	
富尔 116 Fuer 116	FE116	130	
陕单 620 Shaandan 620	SD620	131	
东单 6531 Dongdan 6531	DD6531	133	
联创 825 Lianchuang 825	LC825	135	
先单 13 Xiandan 13	XD13	127	
联创 808 Lianchuang 808	LC808	130	中晚熟 Medium-late maturity
辽单 575 Liaodan 575	LD575	133	
成玉 798 Chengyu 798	CY798	136	
翔玉 7381 Xiangyu 7381	XY7381	132	
铁源 24 Tieyuan 24	TY24	131	
新科 891 Xinke 891	XK891	130	
富育 1512 Fuyu 1512	FY1512	125	中熟 Medium maturity
东单 913 Dongdan 913	DD913	125	
先玉 1331 Xianyu 1331	XY1331	125	
先玉 1330 Xianyu 1330	XY1330	122	
JP6145	JP6145	116	
九圣禾 581 Jiushenghe 581	JSH581	122	
先玉 335 Xianyu 335	XY335	125	
元华 9 Yuanhua 9	YH9	101	中早熟 Medium-early maturity
KX9384	KX9384	111	
陕单 650 Shaandan 650	SD650	105	
KX2030	KX2030	96	

不同程度差异。其中,‘郑单 958’的籽粒含水率最高,平均值为 30.25%;‘KX2030’的籽粒含水率最低,平均值为 24.48%。变异系数平均值为 7.86%,变化幅度为 1.34%~17.78%。进一步分析不同熟期类型品种的籽粒含水率发现,晚熟品种(生育期>125 d)生理成熟期籽粒含水率普遍较高,平均值达 28.16%;中熟品种(生育期 115~125 d)次之,平均值为 27.31%;而早熟品种(生育期<115 d)的籽粒含水率相对最低,平均值为 25.37%。

由表 2 可知,不同玉米品种在产量上存在不同

程度差异,各品种玉米平均产量为 12 300.59 kg·hm^{-2},产量变幅为 8 655.29~16 681.77 kg·hm^{-2}。其中,'先玉 1330'的产量最为突出,高达 16 681.77 kg·hm^{-2};'先玉 1321'次之,产量为 15 979.91 kg·hm^{-2};'元华 9'的产量最低,仅为 8 655.29 kg·hm^{-2}。

表 3 结果显示,玉米籽粒脱水特性与灌浆参数存在显著相关性。授粉~生理成熟期天数与生理成熟期籽粒含水率呈极显著正相关关系($r=0.625$),而与生理成熟前脱水速率呈极显著负相关关系($r=-0.870$);授粉~生理成熟期积温同样与生理成熟前脱水速率显著负相关($r=-0.911$)。生理成熟期籽粒籽粒含水率与收获期籽粒含水率呈极显著正相关关系($r=0.731$),且二者均与总脱水速率显著负相关($r=-0.873$和-0.709);生理成熟前脱水速率与总脱水速率极显著正相关($r=0.818$),表明优化灌浆期脱水效率可提高机械粒收适应性。

表 2　不同玉米品种生理成熟期籽粒含水率及脱水特性

Table 2　Grain moisture content and dehydration characteristics of different maize varieties at physiological maturity (PM)

品种 Variety	生理成熟期籽粒含水率 Grain moisture at PM/%	授粉~生理成熟期积温 Accumulated temperature of pollination to PM/℃	生理成熟前脱水速率 Pre-PM dehydration rate /(%·℃$^{-1}$·d^{-1})	生理成熟后脱水速率 Post-PM dehydration rate /(%·℃$^{-1}$·d^{-1})	总脱水速率 Total dehydration rate /(%·℃$^{-1}$·d^{-1})	产量 Yield /(kg·hm^{-2})
郑单 958 ZD958	30.25a	1673	0.036jk	0.023m	0.035gh	12408.04ghij
真金 308 ZJ308	29.05abc	1599	0.038hi	0.035fg	0.037ef	13883.38d
泽玉 8911 ZY8911	27.99abcde	1574	0.039gh	0.032ij	0.038de	14856.82c
元华 9 YH9	26.21defg	1331	0.048b	0.020n	0.037ef	8655.29o
新玉 77 XY77	28.32abcd	1599	0.039gh	0.031j	0.037ef	12633.19ghi
新玉 47 XY47	29.14abc	1734	0.035ki	0.042b	0.036fg	12382.54ghij
新科 891 XK891	27.24bcdef	1515	0.041ef	0.032ij	0.039cd	9737.91mn
翔玉 7381 XY7381	28.14abcd	1574	0.039gh	0.037de	0.039cd	11456.41k
先玉 335 XY335	26.46defg	1472	0.043d	0.035fg	0.041ab	12247.88hij
先玉 1331 XY1331	28.37abcd	1587	0.039gh	0.031j	0.037ef	11953.90g
先玉 1330 XY1330	27.75abcdef	1475	0.042de	0.033hi	0.040bc	16681.77a
先玉 1321 XY1321	28.14abcd	1676	0.037ij	0.048a	0.038de	15979.91b
先单 13 XD13	27.65bcdef	1521	0.041ef	0.035fg	0.040bc	14582.45c
铁源 24 TY24	27.80abcde	1558	0.040fg	0.033hi	0.039cd	12872.35fg
陕单 650 SD650	25.22fg	1640	0.040fg	0.018o	0.036fg	9409.78n
陕单 620 SD620	27.04cdef	1613	0.039gh	0.020n	0.035gh	9947.82m
辽单 585 LD585	29.70ab	1726	0.035kl	0.039c	0.035gh	10653.20l
辽单 575 LD575	27.47bcdef	1628	0.038hi	0.035fg	0.038de	12692.67gh
联创 825 LC825	28.71abcd	1710	0.036jk	0.036ef	0.036fg	14461.25c
联创 808 LC808	27.65bcdef	1766	0.035kl	0.031j	0.035gh	12869.93fg
九玉 MO3 JYM03	27.18bcdef	1684	0.037ij	0.023m	0.034hi	12880.78fg
九圣禾 581 JSH581	26.80cdefg	1420	0.045c	0.027l	0.040bc	13321.37ef
九圣禾 2468 JSH2468	27.23bcdef	1576	0.040fg	0.032ij	0.039cd	13804.95de
淮玉 6 HY6	28.60abcd	1788	0.034l	0.029k	0.034hi	10651.26l
富育 1512 FY1512	27.72abcdef	1645	0.038hi	0.027l	0.036fg	13296.38ef
富尔 116 FE116	27.04cdef	1586	0.040fg	0.038cd	0.039cd	13729.85de
东单 913 DD913	27.20bcef	1527	0.0410ef	0.024m	0.037ef	9810.93mn
东单 6531 DD6531	27.76abcdef	1613	0.039gh	0.034gh	0.038de	13581.08de
东单 1331 DD1331	28.37abcd	1807	0.034l	0.024m	0.033i	12799.62jk
成玉 798 CY798	29.34abc	1627	0.037ij	0.029k	0.037ef	10915.01l
KX9384	25.58efg	1438	0.045c	0.020n	0.036fg	11566.23k
KX3564	27.29bcdef	1542	0.041ef	0.036ef	0.040bc	9939.62m
KX2030	24.48g	1201	0.055a	0.020n	0.042a	9413.43n
JP6145	26.85cdefg	1530	0.041ef	0.023m	0.036fg	12143.09ij

注:同列不同小写字母表示品种间差异达显著水平($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significance differences between varieties ($P<0.05$).

34 个玉米品种生理成熟期的籽粒含水率分布如图 3 所示,其中籽粒含水率介于 26%~28%的品种有 19 个,占比 55.9%;低于 26%的品种有 3 个,占比 8.8%;高于 28%的品种 12 个,占比 35.3%。

2.2 不同玉米品种籽粒含水率的动态变化

玉米籽粒含水率与授粉后积温之间的动态关系如图 4 所示,籽粒含水率与授粉后积温呈显著负相关关系($P<0.01$)。在授粉初期(积温较低阶段),籽粒含水率相对较高;随着授粉后积温的逐渐增加,籽粒含水率显著下降;接近成熟期时,籽粒的含水率下降速率逐渐放缓并趋于稳定。对 2017—2018 年 34 个玉米品种共计 550 个样本点的籽粒含水率通过 Logistic Power 函数进行拟合,得到模型方程为 $y=90/(1+x/992.201)^{1.895}$,其中 y 为籽粒含水率,x 为授粉后积温。模型决定系数(R^2)为 0.961($P<0.01$),表明该模型可解释观测数据中 96.1%的籽粒含水率变异;模型均方根误差(*RMSE*)为3.1%,反映了模型预测值与实测值之间的平均偏差水平。如图 4 所示,模型拟合曲线能准确捕捉并反映籽粒含水率随积温增加而下降的整体趋势与关键特征(初期快速下降,后期渐趋平缓),且与实测数据点吻合度良好。综合高 R^2 值、低 *RMSE* 值及良好的图形拟合效果可知,该模型对玉米籽粒含水率动态过程的拟合效果良好。

选取当地种植面积较大且涵盖不同熟期的‘KX9384’、‘先玉 335’、‘郑单 958’和‘新玉 77’共 4 个代表性玉米品种,进一步分析其在不同试验年份籽粒含水率的动态变化。由图 5 可知,4 个品种的

表 3 玉米籽粒脱水特性与灌浆阶段参数的相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix between grain dehydration characteristics and grain-filling stage parameters of maize

性状 Character	授粉~生理成熟期天数 Days from pollination of PM	授粉~生理成熟期积温 Accumulated temperature of pollinatin to PM	生理成熟期籽粒含水率 Grain moisture content at PM	收获期籽粒含水率 Grain moisture content at harvest	生理成熟前脱水速率 Pre-PM dehydration rate	生理成熟后脱水速率 Post-PM dehydration rate	总脱水速率 Total dehydration rate
授粉~生理成熟期天数 Days from pollination to PM	1.000	0.911**	0.625**	0.720**	−0.870**	0.245	−0.591*
授粉~生理成熟期积温 Accumulated temperature of pollinatin to PM		1.000	0.610*	0.696**	−0.911**	0.246	−0.644**
生理成熟期籽粒含水率 Grain moisture content at PM			1.000	0.731**	−0.879**	0.137	−0.873**
收获期籽粒含水率 Grain moisture content at harvest				1.000	−0.789**	−0.158	−0.709**
生理成熟前脱水速率 Pre-PM dehydration rate					1.000	−0.243	0.818**
生理成熟后脱水速率 Post-PM dehydration rate						1.000	0.235
总脱水速率 Total dehydration rate							1.000

注:** 和 * 分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: ** and * indicate significant differences at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively.

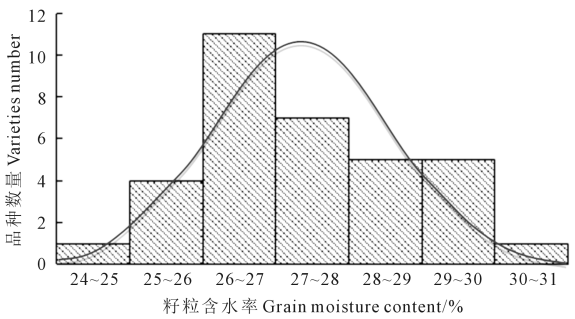

图 3 不同玉米品种生理成熟期籽粒含水率的分布

Fig.3 Grain moisture content distribution at physiological maturity of different maize varieties

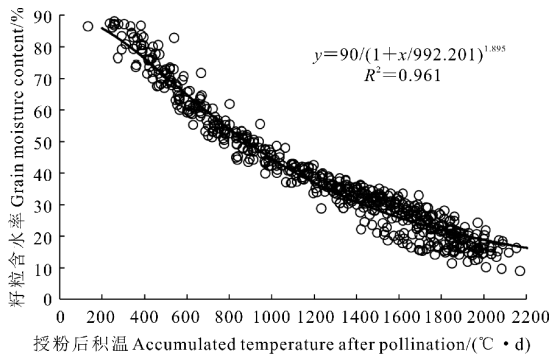

图 4 玉米籽粒含水率随授粉后积温的变化

Fig.4 Changes of grain moisture content of maize with accumulated temperature after pollination

籽粒含水率随授粉后积温增长的变化趋势,在不同年际间均表现出高度一致性。

2.3　玉米籽粒含水率与机械粒收质量的关系

籽粒破碎率是评估机械粒收质量的关键指标。通过对机械粒收时籽粒含水率与破碎率进行拟合(图 6)发现,籽粒含水率与破碎率呈显著正相关关系,二者关系可用二次函数 $y = 0.0366x^2 - 1.3404x + 16.525$ 表示(y 为籽粒破碎率,x 为籽粒含水率,决定系数 $R^2 = 0.2547$)。基于上述拟合关系计算可知,理论最小破碎率为 4.32%,此时对应的籽粒含水率为 18.31%。根据国家谷物收获机械作业质量标准(GB/T 21962-2020,籽粒破碎率均值≤5.0%)要求,将破碎率≤5.0%代入拟合方程模拟,得出满足此质量标准的适宜籽粒含水率范围为13.86%~22.76%。

如图 7 所示,在试验调查范围内,机械粒收时杂质率随着收获时籽粒含水率的升高呈上升趋势,二者存在显著正相关关系,可用方程 $y = 0.0061x^2 - 0.2341x + 2.8287$(决定系数 $R^2 = 0.0848$)进行拟合。根据拟合方程模拟,籽粒含水率低于 38.37%进行收获能够满足机械粒收籽粒杂质率低于 3%的国家标准要求。但同一水分条件下杂质率差值较大,说明有其他因素影响杂质率。

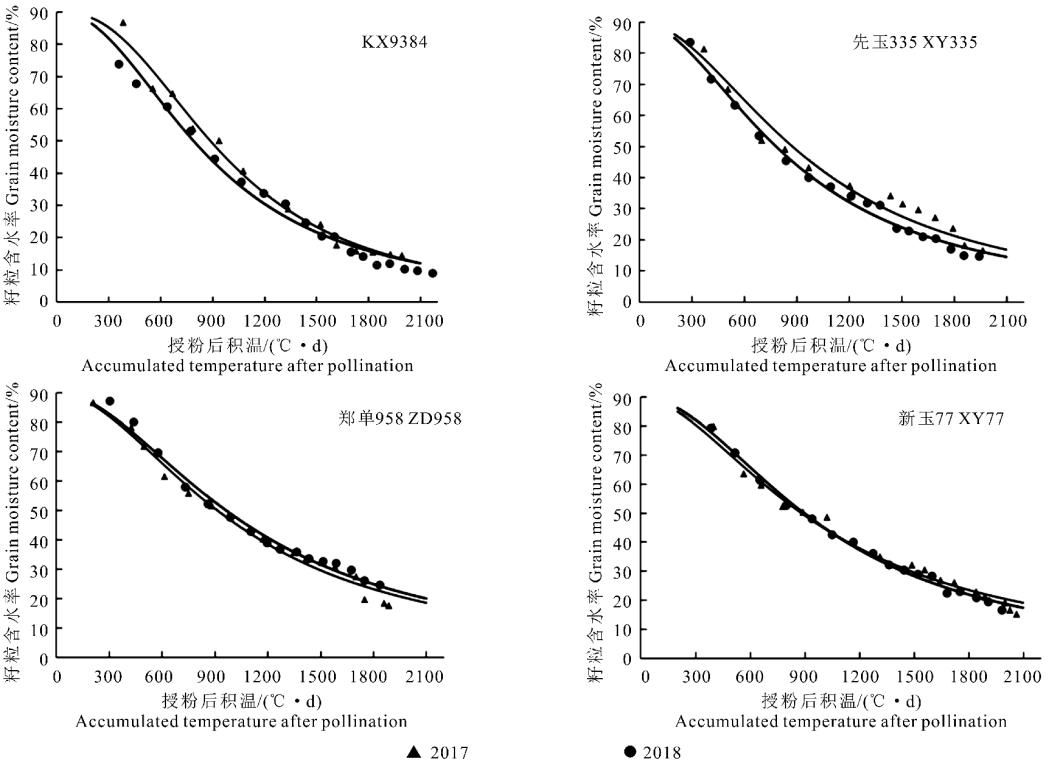

图 5　不同玉米品种籽粒含水率随授粉后积温的变化

Fig.5　Changes of grain moisture content of different maize varieties with the accumulated temperature after pollination

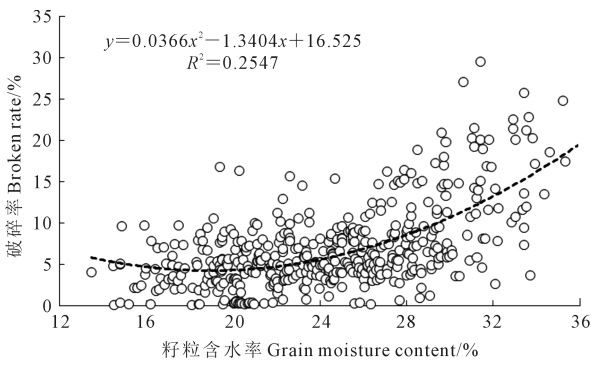

图 6　玉米籽粒含水率与破碎率的关系

Fig.6　Relationship between moisture content and broken rate of maize grain

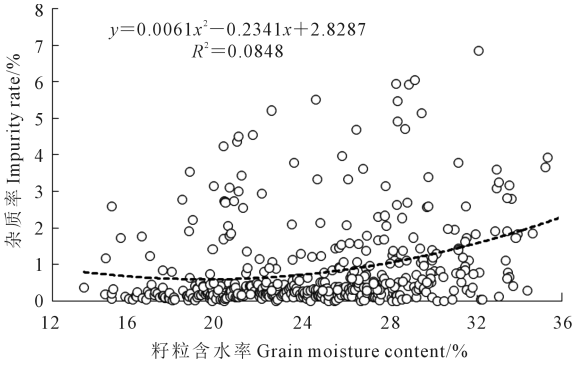

图 7　玉米籽粒含水率与杂质率的关系

Fig.7　Relationship between moisture content and impurity rate of maize grain

如图 8 所示,在试验调查范围内,机械粒收时产量损失率随着收获时籽粒含水率的升高呈现出增大的趋势,二者存在显著正相关关系,可用方程 $y=0.0144x^2-0.5639x+6.0206$(决定系数 $R^2=0.1351$)进行拟合。根据拟合方程模拟,籽粒含水率低于 37.25%进行收获,能够满足机械粒收产量损失率低于 5%的国家标准要求。

2.4 玉米籽粒含水率和产量的关系

采用双向平均法,依据不同玉米品种在生理成熟期的籽粒含水率与产量构建散点图(图 9),将 34 个参试品种划分为以下 4 类:

(1)低籽粒含水率且高产型品种:共包含 4 个品种,即‘JYMO3’、‘FE116’、‘JSH581’、‘LD575’,此类品种在成熟期籽粒含水率较低且产量较高。

(2)高籽粒含水率且高产型品种:共包含 13 个品种,即‘XY1330、‘ZY8911’、‘XY1321’、‘XD13’、‘LC825’、‘LSH2468’、‘ZJ308’、‘DD6531’、‘FY1512’、‘XY1331’、‘TY24’、‘LC808’、‘XY77’,此类品种虽然在成熟期籽粒含水率较高,但产量也较高。

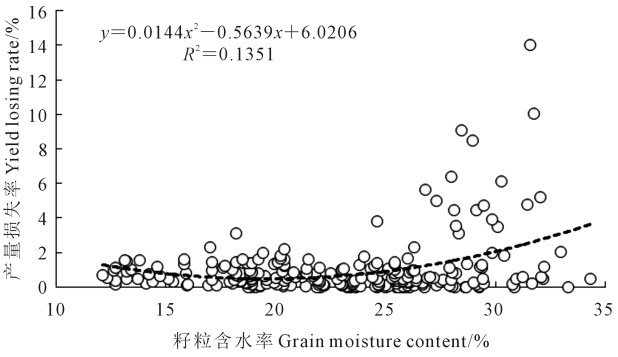

图 8 玉米籽粒含水率与产量损失率的关系

Fig.8 Relationship between grain moisture content and yield losing rate of maize

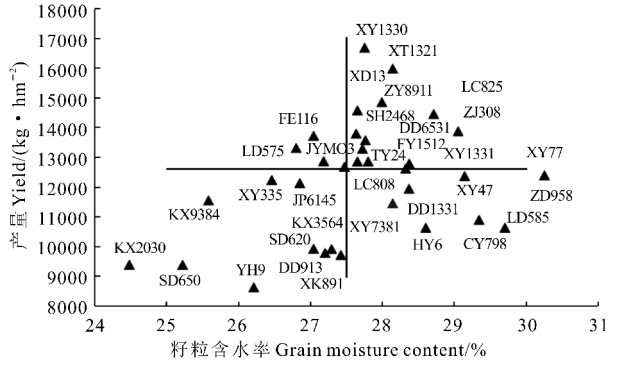

图 9 不同玉米品种产量和籽粒含水率的关系

Fig.9 Relationship between yield and grain moisture content of different maize varieties

(3)低籽粒含水率且低产型品种:共包含 10 个品种,即‘KX9384’、‘YH9’、‘SD650’、‘XY3355’、‘JP6145’、‘KX3564’、‘SD620’、‘KX2030’、‘DD913’、‘XK891’,此类品种在成熟期籽粒含水率较低,但产量也低。

(4)高籽粒含水率且低产型品种:共包含 7 个品种,即‘HY6’、‘LD585’、‘CY798’、‘XY47’、‘ZD958’、‘DD1331’、‘XY7381’,此类品种在成熟期籽粒含水率较高且产量低。

3 讨 论

3.1 不同玉米品种间籽粒含水率差异性

本研究通过对北疆地区 34 个不同熟期春玉米品种的系统分析发现,在大陆性干旱气候条件下,玉米品种间生理成熟期的籽粒含水率及其动态变化存在显著差异,这一结果与前人研究相符[18-19]。在北疆气候条件下,‘郑单 958’含水率最高(30.25%),‘KX2030’含水率最低(24.48%),这种差异可能是由于不同品种的遗传背景差异,导致其在籽粒发育过程中对水分的保持和散失能力不同所致[13,20-21]。从生理机制上看,遗传因素可能影响了籽粒细胞结构、细胞膜透性以及水分运输相关基因的表达,进而影响脱水速率[2]。此外,环境条件如温度、湿度等也可能通过调节植物的生理代谢过程,与遗传因素相互作用,影响籽粒脱水速率[5,22]。这一发现为玉米品种适应性选择和收获时期确定提供了重要依据,在品种选育过程中需综合考虑遗传和环境因素对籽粒脱水特性的影响。

3.2 籽粒含水率对玉米产量的影响

李璐璐[16]研究发现,籽粒脱水速率影响灌浆物质积累,进而影响玉米产量。本研究通过深入探讨北疆地区春玉米籽粒脱水速率与产量的关系发现,‘先玉 1330’的快速脱水特性与其高产量(16 681.77 kg·hm^{-2})密切相关。可能是快速脱水有助于维持籽粒灌浆过程中的源库平衡,灌浆后期快速脱水可促使光合产物更有效地向籽粒转运,减少营养物质在茎叶中的积累,从而提高产量。相反,高含水率且产量较低的品种(如‘东单 913’,产量为 9 810.93 kg·hm^{-2}),在干旱环境下可能因水分过多导致呼吸作用增强,消耗过多光合产物,同时影响营养物质向籽粒的运输效率,限制了产量潜力。这与前人研究中提到的玉米籽粒脱水速率与产量密切相关的结论相符[23-24]。这一结果为北疆干旱地区玉米品种选育提供了理论依据,表明在育种过程中应注重筛选脱水速率与产量潜力相匹配的品种,以实现高

产目标。

3.3　气象因素对玉米籽粒脱水特性的影响

气象因素对玉米籽粒脱水特性具有显著影响[25]。研究表明,高温可以加速水分蒸发,促进籽粒脱水;而湿度增加则会减缓脱水速率,可能是因为高湿度环境降低了籽粒与周围空气的水势差,抑制了水分散失[26]。降水通过影响土壤水分含量和空气湿度间接作用于籽粒脱水[27]。积温是影响玉米籽粒脱水过程的关键因素,与籽粒含水率呈显著负相关关系[23]。本研究发现,不同玉米品种籽粒含水率随授粉后积温变化趋势高度一致,这验证了积温对籽粒脱水过程的调控作用。此外,不同年份间气象条件的差异虽然存在,但总体上籽粒含水率的变化规律较为一致,说明积温对玉米生长发育进程的影响相对稳定。

3.4　玉米籽粒含水率对机械粒收质量的影响

籽粒含水率是影响机械粒收质量的关键因素之一。通过合理控制籽粒含水率并优化收获流程,可以有效降低破碎率、杂质率和产量损失率,从而提高机械粒收的整体质量。本研究表明,玉米籽粒含水率与破碎率之间呈显著正相关关系,当籽粒含水率在13.86%~22.76%之间时,破碎率能达到国家标准(<5%)的要求,这与李璐璐等[28]、王克如等[29]、杨柯等[30]的研究结果相似,即当含水率高于某一阈值时,破碎率显著增加,可能是因为高含水率增加了籽粒的柔韧性,使其在机械外力作用下更易变形和受损。本研究还表明,籽粒含水率为18.31%时,破碎率最低,这与赵波等[31]的研究结果一致。

籽粒含水率的升高会导致杂质率增加。本研究指出,杂质率随含水率的升高而上升,当玉米籽粒含水率低于 38.37%时,杂质率低于 3%的国家标准,这与李璐璐等[28]研究结果基本一致,可能是因为高含水率籽粒表面粘性增加,容易吸附灰尘、秸秆碎屑等杂质,且在收获过程中,潮湿的籽粒与杂质更易粘连,不易分离。本研究还发现,同一水分条件下杂质率差值较大,这可能与收获机械的性能、田间杂草状况以及收获操作规范程度等因素有关。

高含水率籽粒在收获过程中更容易掉落和破损,导致产量损失率增加。本研究发现,玉米产量损失率与籽粒含水率呈显著正相关关系,当籽粒含水率高于 37.25%时,产量损失率明显增加,这与阎晓光等[32]的研究结果一致,可能是因为过高的含水率使籽粒在脱离果穗和运输过程中更易散落,霉变和发芽的风险增加。因此,合理控制籽粒含水率对于减少产量损失和提高机械粒收质量至关重要。

3.5　玉米品种适应性选择和未来研究方向

本研究基于籽粒含水率和产量综合评价,筛选出‘先单 13’、‘先玉 1330’等适合北疆推广的品种。然而,对于高含水率且高产品种,尽管其产量具有一定优势,但较高的含水率在收获和储存过程中可能引发一系列潜在问题,可借鉴先进的基因编辑和分子育种技术[13],在现有品种的基础上,通过精准定位和调控与籽粒脱水相关的基因,改善这些品种的脱水特性。本研究虽涉及不同熟期品种的比较,但尚未深入分析不同熟期品种间籽粒灌浆、脱水特性及产量的相互影响机制,后期研究将进一步探讨这些因素的互作机制,如开展混播和分期播种试验,运用作物生长模型模拟预测;优化气象监测和数据分析方法,运用先进技术挖掘气象与脱水特性关系,为玉米产业的可持续发展提供更有力的技术支撑。

4　结　论

1)北疆地区 34 个春玉米品种生理成熟期籽粒含水率平均值为 27.33%,变幅为 24.48%~30.25%,其中‘郑单 958’最高,‘KX2030’最低,不同品种间差异显著(变异系数平均值 7.86%,范围 1.34%~17.78%)。构建的籽粒含水率与授粉后积温的非线性回归模型表明,二者呈显著负相关关系,该模型能精准预测籽粒含水率变化趋势。

2)籽粒含水率与机械粒收过程中的破碎率、杂质率和产量损失率密切相关,籽粒含水率为 18.31%时,破碎率最小(4.32%)。当籽粒含水率介于 13.86%~22.76%范围时,破碎率均值可小于 5%;低于 38.37%时,杂质率小于 3%;低于 37.25%时,产量损失率小于 5%,符合国家标准。

3)基于生理成熟期籽粒含水率和产量,采用双向平均法将玉米品种分为 4 类,分别为低含水率高产量型、高含水率高产量型、低含水率低产量型和高含水率低产量型。筛选出‘先玉 1330’、‘先单 13’、‘九圣禾 2468’和‘富尔 116’共 4 个低含水率(<27.5%)、高脱水速率(>0.038 %·℃$^{-1}$·d^{-1})、高产(>13 500 kg·hm^{-2})的优良品种,可作为北疆地区适宜机械粒收的推荐品种。

参 考 文 献:

[1] 仇焕广, 张世煌, 杨军, 等. 中国玉米产业的发展趋势、面临的挑战与政策建议[J]. 中国农业科技导报, 2013, (1): 20-24.
QIU H G, ZHANG S H, YANG J, et al. Development of China maize

industry, challenges in the future and policy suggestions[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, (1): 20-24.

[2] 李璐璐, 明博, 高尚, 等. 不同熟期玉米品种籽粒田间脱水特征差异性分析[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1643-1652.
LI L L, MING B, GAO S, et al. Characteristic difference in grain in-field drydown between maize cultivars with various maturation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(6): 1643-1652.

[3] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒脱水速率影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2027-2035.
WANG K R, LI S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2027-2035.

[4] 李雪洁, 张红祥, 姜雯, 等. 不同玉米品种籽粒灌浆与脱水特性的差异性研究[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 39-48.
LI X J, ZHANG H X, JIANG W, et al. Difference analysis of grain filling and dehydration characteristics of different maize varieties[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(2): 39-48.

[5] 管霞. 河北省宜籽粒机收玉米生长发育特征及其机收性能研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
GUAN X. Research on the growth and development characteristics and machine harvesting performance of maize suitable for grain machine harvesting in Hebei Province[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2021.

[6] 高星, 李永祥, 杨明涛, 等. 基于高密度遗传图谱的玉米籽粒灌浆特性遗传解析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(21): 4087-4099.
GAO X, LI Y X, YANG M T, et al. Genetic analysis of grain filling characteristics of maize based on high-density genetic linkage map[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(21): 4087-4099.

[7] 肖珊珊, 张翼飞, 杨克军, 等. 不同熟期品种间作对春玉米籽粒灌浆、脱水特性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(12): 2294-2310.
XIAO S S, ZHANG Y F, YANG K J, et al. Effects of intercropping with different maturity varieties on grain filling, dehydration characteristics and yield of spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(12): 2294-2310.

[8] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 黄淮海区主推夏播玉米品种籽粒脱水特性研究[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 708-719.
XU T J, LV T F, ZHAO J R, et al. The grain dehydration characteristics of the main summer maize varieties in Huang-Huai-Hai region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(4): 708-719.

[9] 赵如浪. 宁夏引/扬黄灌区玉米籽粒脱水过程与关键品质变化及调控[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
ZHAO R L. Dehydration process and key quality changes and regulation of maize kernels in Ningxia Yellow River Irrigation Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[10] 郭怀怀, 于晓芳, 高聚林, 等. 深松耕作对不同年代玉米品种籽粒脱水特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(3): 421-435.
GUO H H, YU X F, GAO J L, et al. Effects of subsoiling tillage on grain dehydration characteristics of maize hybrids in different eras[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(3): 421-435.

[11] 李青松, 马中义, 丁贵江, 等. 不同熟期玉米品种和种植密度对子粒脱水特性及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2023, 27(2): 37-43.
LI Q S, MA Z Y, DING G J, et al. Effects of maize varieties with different maturity periods and planting density on grain dehydration characteristics and yield[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(2): 37-43.

[12] 张凤启, 张君, 张莹莹, 等. 玉米子粒不同发育阶段脱水速率的遗传分析[J]. 玉米科学, 2021, 29(1): 26-32.
ZHANG F Q, ZHANG J, ZHANG Y Y, et al. Genetic analysis of kernel dehydration rate at different development stages in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 26-32.

[13] 渠建洲. 玉米籽粒含水率和脱水速率的基因挖掘与分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
QU J Z. Gene mining and analysis of maize grain moisture content and dehydration rate[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[14] 黄兆福, 明博, 王克如, 等. 辽河流域玉米籽粒脱水特点及适宜收获期分析[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 922-931.
HUANG Z F, MING B, WANG K R, et al. Characteristics of maize grain dehydration and prediction of suitable harvest period in Liao River Basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(6): 922-931.

[15] 朱亚利, 王晨光, 杨梅, 等. 不同熟期玉米不同粒位籽粒灌浆和脱水特性对密度的响应[J]. 作物学报, 2021, 47(3): 507-519.
ZHU Y L, WANG C G, YANG M, et al. Response of grain filling and dehydration characteristics of kernels located in different ear positions in the different maturity maize hybrids to plant density[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(3): 507-519.

[16] 李璐璐. 玉米籽粒脱水特征及与灌浆的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
LI L L. Dehydration characteristics of maize kernels and its relationship with grain filling[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.

[17] 苟晓楠. 不同熟性玉米自交系籽粒脱水特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
GOU X N. Study on the kernel dehydration characteristics of maize inbred lines with different maturity[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[18] 王荣焕, 徐田军, 陈传永, 等. 不同熟期类型玉米品种籽粒灌浆和脱水特性[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 149-158.
WANG R H, XU T J, CHEN C Y, et al. Grain filling and dehydrating characteristics of maize hybrids with different maturity[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(1): 149-158.

[19] 刘倩倩, 陈祥, 刘佳媛, 等. 四川夏玉米籽粒灌浆脱水特性研究[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(1): 6-13, 67.
LIU Q Q, CHEN X, LIU J Y, et al. Study on dehydration characteristics and grain filling of summer maize in Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(1): 6-13, 67.

[20] 陈明, 陈琛, 刘晨旭, 等. 玉米杂交当代籽粒含水率遗传效应研究[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 1-7.
CHEN M, CHEN C, LIU C X, et al. Current generation genetic effect of the kernel moisture content in maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10): 1-7.

(下转第158页)