

深松耕作对不同年代玉米品种生理成熟后的抗倒伏力学特性的影响

马达灵,高慧霞,于晓芳,高聚林,李博

(内蒙古农业大学农学院,内蒙古呼和浩特 010019)

摘要:以1970—2010s主推玉米品种为材料,设置深松与浅旋耕处理,研究深松耕作对不同年代玉米品种生理成熟后的抗倒伏力学特征的影响。结果表明,生理成熟后玉米倒伏率增加;与浅旋耕相比,深松耕作使不同玉米品种的茎折率平均降低1.22个百分点,茎秆力学强度增加;高密度下玉米茎秆力学强度的增幅更加明显,1970s品种第4节间压碎强度增加了43.6%、第5节间弯曲强度增加了33.05%;1980s品种第3~5节间穿刺强度和第3、5节间弯曲强度、1990s品种第4节间压碎强度和第3节间弯曲强度、2000s品种第3~5节间穿刺强度和第3节间弯曲强度也有明显增加;而2010s品种在深松高密与浅旋高密下,茎秆力学强度指标无明显变化。深松耕作对玉米群体生理成熟后抗倒性的提高与第3、4节间穿刺强度、第4节间弯曲强度和第3、5节间压碎强度的增加密切相关;但随着品种演替茎秆力学强度无明显增强,第3节间穿刺强度以 $0.26 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率降低。由此可见,茎秆力学强度可作为构建玉米抗倒伏群体的指标,但评价品种抗茎折能力具有一定片面性,后续研究需关注构建综合的评价指标体系。

关键词:玉米;深松;力学强度;茎折;生理成熟

中图分类号:S513;S365 **文献标志码:**A

Effects of subsoiling tillage on stalk lodging resistant mechanical characteristic of maize varieties after physiological maturity

MA Daling, GAO Huixia, YU Xiaofang, GAO Julin, LI Bo

(Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, 010019, China)

Abstract: The subsoiling tillage and rotary tillage were studied for their effects on maize stalk lodging resistant mechanical characteristic after physiological maturity using maize varieties released during 1970s to 2010s. The results showed that maize stalk lodging increased after physiological maturity. For different maize varieties, stalk lodging reduced by an average of 1.22 percentage point, and mechanical strength significantly increased at subsoiling tillage compared with those at shallow rotary tillage. The mechanical strength changes were larger at high planting density. The fourth crushing strength and the fifth internode bending strength of the 1970s variety increased respectively by 43.6% and 33.05%. The third to the fifth internodes rind puncture strength and the third and fifth internode bending strength of the 1980s variety, the fourth crushing strength and the third internode bending strength of the 1990s variety, the third to the fifth internodes rind puncture strength and the third internode bending strength of the 2000s variety had also significantly increased, whereas mechanical strength of the 2010s variety had no obvious change, under subsoiling tillage compare to shallow rotary tillage at high density. The stalk lodging resistance improvement was correlated with the increases of the 3rd and 4th internodes rind puncture strength and the 4th internodes bending strength and the 3rd and 5th internodes crushing strength at subsoiling tillage. However, the me-

收稿日期:2022-03-23

修回日期:2022-08-31

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS03053);内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项项目(KJXM2020001-06);国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-50);内蒙古自治区科技重大专项项目(2021ZD0003)

作者简介:马达灵(1978-),女,内蒙古呼和浩特人,博士,主要从事寒旱区作物栽培生理生态研究。E-mail:madaling@sina.com

通信作者:于晓芳(1974-),女,内蒙古赤峰人,博士,主要从事寒旱区作物栽培生理生态研究。E-mail:yuxiaofang75@163.com

高聚林(1964-),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,主要从事寒旱区作物栽培生理生态研究。E-mail:nmgaojulin@163.com

chanical strength of internodes did not significantly increase and the puncture strength of the 3rd internode decreased by $0.26 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ with improved maize varieties. Therefore, it was suggested that stalk mechanical characteristics were used to construct maize lodging resistance population but was not used to evaluate maize varieties stalk lodging resistance because of their one-sidedness. Attention should be paid to building a comprehensive evaluation index system of maize variety stalk lodging resistance in future.

Keywords: maize; subsoiling tillage; mechanical strength; stalk lodging; physiological maturity

内蒙古自治区是我国 13 个粮食主产省和 5 个粮食净调出省之一,玉米作为自治区第一大粮食作物,是国家粮食安全与农牧民增产增收的重要保障,因此,确保玉米持续增产增效成为该区农业生产的首要任务之一。20 世纪 50 年代以来,玉米持续增产得益于品种改良及栽培措施改进,其中增加种植密度成为“结构性增产”的主要途径^[1-2]。与我国玉米高产记录种植密度 $9\ 000 \text{ 株} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 相比,目前内蒙古自治区玉米平均种植密度仅为 $4\ 000 \text{ 株} \cdot 667\text{m}^{-2}$,差距较大;由于生产中长期采用小动力农机具整地,土壤犁底层加厚,阻碍玉米根系下扎,导致植株对土壤养分和水分的利用效率降低,再增密倒伏加重(倒伏率 8% 以上),造成增密不增产,并且制约了机械化籽粒直收(要求田间植株倒伏率低于 5%)^[3-4]。因而倒伏成为了限制内蒙古玉米单产和机械化籽粒直收质量提高的瓶颈问题^[5]。

茎折占玉米倒伏情况的 30%~60%,生育期茎折阻碍植株养分与水分传输,生理成熟后茎折直接决定了机械粒收质量的高低^[6]。前人研究表明玉米基部第 3 茎节穿刺强度、穗下部节间抗压碎强度、弯曲强度可以较直接地反映茎秆抗折能力^[7-10]。玉米生理成熟后发生茎折也与茎秆力学强度降低密切相关^[6,11]。因此,茎秆力学强度常被作为衡量玉米抗倒伏能力的评价指标。研究表明随着品种的更替,玉米抗茎折能力明显提高,茎秆下部节间的穿刺强度、弯曲强度、压碎强度等力学指标均有增强趋势^[12-13]。采用深松耕作可打破犁底层、增加耕层厚度,有利于玉米根系下扎,提高根系生物量和根系活力,促进地上部物质积累,降低玉米倒伏率,有效容纳更大的群体^[14-17]。

由此可知,通过耕作措施改善土壤耕层、选育耐密植品种均为提高生育期内茎秆抗倒性能的有效途径,然而关于耕作措施如何影响玉米站秆脱水期间抗倒伏性状却少见报道。因此,本研究以深松耕作作为改土措施,以不同年代玉米品种为材料,研究生理成熟后茎秆力学强度演替规律及其对深松的响应,以期选育适宜机械粒收品种和采取深松改土措施实现玉米再增密增产及机械粒收提质增

效提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

大田试验于 2019—2020 年在中国敕勒川现代农业博览园(包头市土默特右旗沟门镇北只图村, $40^{\circ}33'N$, $110^{\circ}31'E$)进行,该试验地土壤类型为沙壤土,0~30 cm 耕层土壤养分含量见表 1。2019 年 5—10 月玉米生长期平均气温为 20.54°C ,降雨量为 370.9 mm ;2020 年玉米生长期平均气温为 17.22°C ,降雨量为 335.6 mm 。

表 1 试验区土壤基础生产力

Table 1 Soil basic productivity in the test area

年份 Year	全氮 Total nitrogen $/(g \cdot kg^{-1})$	碱解氮 Alkaline N $/(mg \cdot kg^{-1})$	速效钾 Alkaline K $/(mg \cdot kg^{-1})$	速效磷 Alkaline P $/(mg \cdot kg^{-1})$	有机质 Organic matter $/(g \cdot kg^{-1})$
2019	1.31	79.31	144.00	18.45	17.74
2020	1.54	74.89	136.28	21.32	17.83

试验材料选取 1970s 到 2010s 曾经在生产上种植面积较大的 5 个玉米品种,分别为中单 2 号(1970s)、丹玉 13(1980s)、掖单 13(1990s)、先玉 335(2000s)和登海 618(2010s)。试验采用裂区设计,耕作方式为主区,设置浅旋耕作(耕作深度 15 cm, CK)、深松耕作(深松 35 cm 后浅旋耕 15 cm, SS)2 种方式;密度为副区,设置高、低 2 个种植密度,分别为 $45\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LD)、 $105\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (HD);品种为副副区。每个处理 3 次重复。小区行长 8 m,宽 6 m,等行距(0.6 m)种植。

生育期施肥量为:纯 N $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N 肥按 3:6:1 比例分别于拔节期、大喇叭口期、灌浆期随水追肥, P_2O_5 和 K_2O 作基肥一次性施入。其他管理同一般大田。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 玉米茎折率 在成熟期(黑层出现,乳线消失)、收获期(籽粒含水量小于 25%)调查玉米倒伏情况,每小区取中间 4 行,植株从果穗下部折断定义为茎折,记载折断位置,计算茎折率。

1.2.2 茎秆力学强度 在生理成熟期、收获期,每小区选取相邻 3 株玉米,对茎秆地上基部第 3、4、5

节间分别测定茎秆穿刺强度,第 3、5 节间分别测定弯曲强度,第 4 节间测定压碎强度。

力学强度测定采用 SY-S03 植物茎秆强度测量仪。用 1 mm^2 的探头垂直于茎秆方向匀速缓慢压下,穿刺强度为穿透茎秆表皮的最大值;用 0.5 cm^2 的探头垂直于茎秆轴线方向,压住节间中部缓慢匀速加载,弯曲强度为其弯曲折断时的最大值;用 1 cm^2 的探头垂直于茎秆轴线方向,压住节间中部缓慢匀速加载,压碎强度为其撕裂时的强度值。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理与制图,利用 SAS 9.1 统计软件对数据进行方差和相关性分析。采用 LSD(least-significant different)法进行多因素方差分析,明确不同耕作措施、密度、品种组合的差异性;用 Pearson 法对茎秆力学强度与茎折率进行相关性分析;品种释放年代与茎折率、力学强度分别进行直线回归分析,明确指标随品种演替的变化规律。

2 结果与分析

2.1 深松增密对不同年代玉米品种茎折率的影响

由表 2 可知,不同耕作措施、种植密度、品种间的茎折率有明显差异;密度与品种互作对成熟期茎折率有显著影响,因素间互作对收获期茎折率也有明显影响。各处理收获期的茎折率均高于成熟期。

深松耕作(SS)成熟期、收获期的茎折率分别低于浅旋耕作(CK)0.54、1.22 个百分点;种植密度从 4.5 万株· hm^{-2} (LD)增加到 10.5 万株· hm^{-2} (HD)时,倒伏率也随之显著增加,收获期 2 年分别增加了 10.57、4.96 个百分点。随着品种的演替,收获期的茎折率以 $2.21\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率明显降低(2020 年)。新品种茎折率小于老品种,以收获期为例,2010s 品种茎折率较 1970s 2 年分别降低了 19.61 个百分点和 9.47 个百分点。

由表 3 可知,深松高密条件下(SSHD)各品种的茎折率高于浅旋低密(CKLD)而低于浅旋高密(CK-HD),且品种间变幅有差异。以收获期为例,1970s 品种 SSHD 两年茎折率分别高于 CKLD 28.23、11.36 个百分点,较 CKHD 分别低 5.21、2.48 个百分点;2010s 品种 SSHD 茎折率高于 CKLD 0.31 个百分点,较 CKHD 低 0.30 个百分点(2019 年),2020 年增密无茎折发生。由此可见,深松耕作可以降低由增密引发的茎折,且老品种茎折降幅大于新品种,2000s、2010s 品种在收获期的茎折率低于 5%。

2.2 深松增密对不同年代玉米品种茎秆穿刺强度的影响

耕作措施对成熟期第 3、4、5 节间穿刺强度(2019 年)有明显影响,种植密度间各节间穿刺强度均具有明显差异,品种对第 3、5 节间收获期穿刺强度、第 4 节间成熟期穿刺强度有明显影响;因素间两两互作对部分节间穿刺强度有影响,三者互作对穿刺强度无明显影响(表 4)。

SS 较 CK 可明显增加成熟期玉米茎秆穿刺强度,2019 年第 3、4、5 节间分别为 5.24×10^7 、 5.06×10^7 、 $4.45 \times 10^7\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,较 CK 分别增加了 14.16%、14.60%、6.10%。HD 各节间穿刺强度比 LD 显著降低。随着品种的演替,第 3 节间成熟期穿刺强度以 $0.26 \times 10^7\text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率呈明显下降趋势,第 4 节间 2020 年成熟期也有类似趋势,其他指标变化无明显规律(表 4)。

表 2 2019—2020 年耕作措施、密度、品种对玉米茎折率影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance about effects of tillage method, density and maize variety on stalk lodging in 2019 and 2020

指标 Indicator	成熟期茎折率/% Stalk lodging at mature period		收获期茎折率/% Stalk lodging at harvest period	
	2019	2020	2019	2020
SS	3.80	1.99	5.67	2.67
CK	4.45	2.42	7.32	3.46
LD	0.43	0.42	1.21	0.59
HD	7.83	3.99	11.78	5.55
1970s	16.38	7.66	19.84	9.47
1980s	2.44	1.97	4.76	3.21
1990s	1.65	1.40	5.67	2.66
2000s	0.15	0.00	1.98	0.00
2010s	0.02	0.00	0.23	0.00
速率 Slope /(% · 10a^{-1})	-3.50	-1.73	-4.20	-2.21
R^2	0.64ns	0.74ns	0.73ns	0.82*
耕作措施 Tillage method(T)	*	**	**	**
密度 Density(D)	**	**	**	**
耕作×密度 T×D	ns	ns	**	**
品种 Variety(V)	**	**	**	**
耕作×品种 T×V	ns	ns	**	**
密度×品种 V×D	**	**	**	**
耕作×密度×品种 T×D×V	ns	ns	*	**

注:“*”、“**”,“ns”分别表示处理间差异显著、极显著和不显著。下同。

Note: *, ** and ns mean significant difference, highly significant difference and non-significant among different treatments. The same below.

进一步分析,各品种的穿刺强度在 SSLD 与 CKLD 条件下无明显差异;部分品种 SSHD 条件下的节间穿刺强度与 CKLD 也无差异,但明显高于 CKHD。以第 3 节间穿刺强度为例(2 a 平均),1980s、2000s 品种成熟期 SSHD 较 CKHD 分别增加了 125.75%、51.62%,收获期分别增加了 175.54%、56.54%(图 1);2000s 品种的第 4 节间穿刺强度 SSHD 较 CKHD 成熟期增加 55.22%、收获期增加 61.94%(图 2);1990s 和 2010s 品种成熟期 SSHD 第 5 节间穿刺强度较 CKHD 分别增加了 78.01%、69.53%,收获期 1980s 品种增加了 65.90%(图 3)。

综上所述,在增密条件下深松耕作较浅旋可提

高玉米茎秆节间穿刺强度,但不同年代品种响应无明显规律。

2.3 深松增密对不同年代玉米品种茎秆压碎强度和弯曲强度的影响

耕作措施对成熟期压碎强度(2019 年)、收获期压碎强度(2020 年)有明显影响,SS 压碎强度成熟期、收获期分别为 2.70×10^6 、 $2.83 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,与 CK 相比,分别提高了 29.19%、19.92%;种植密度对压碎强度也有明显影响,LD 压碎强度明显高于 HD 约 2 倍;随着品种的更替,压碎强度无明显变化规律,品种间收获期压碎强度(2020 年)有显著差异,1990s 品种最低,为 $2.34 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 5)。

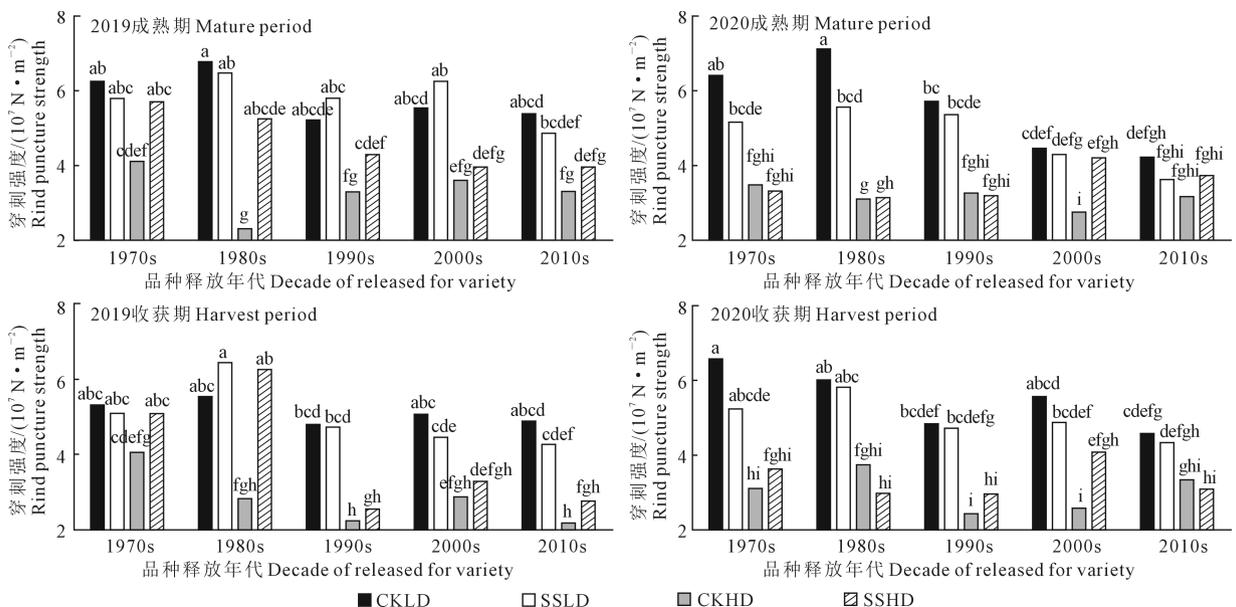
表 3 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的茎折率/%

Table 3 Stalk lodging of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

年度 Year	品种年代 Decade of released for variety	成熟期 Mature period				收获期 Harvest period			
		CKLD	SSLD	CKHD	SSHD	CKLD	SSLD	CKHD	SSHD
2019	1970s	2.18def	1.35efg	32.34a	29.65b	4.72f	3.53fg	38.16a	32.95b
	1980s	0.57fg	0.20fg	4.85c	4.15cd	2.22gh	1.42hi	8.56de	6.83e
	1990s	0.00g	0.00g	3.92cd	2.67de	0.19i	0.00i	14.25c	8.24de
	2000s	0.00g	0.00g	0.61fg	0.00g	0.00i	0.00i	4.45f	3.45fg
	2010s	0.00g	0.00g	0.08g	0.00g	0.00i	0.00i	0.61hi	0.31i
2020	1970s	2.53de	1.66e	13.81a	12.65b	3.39f	2.50g	17.23a	14.75b
	1980s	0.00f	0.00f	4.57c	3.30d	0.00h	0.00h	7.61c	5.24e
	1990s	0.00f	0.00f	3.28d	2.33de	0.00h	0.00h	6.41d	4.23f
	2000s	0.00f	0.00f	0.00f	0.00f	0.00h	0.00h	0.00h	0.00h
	2010s	0.00f	0.00f	0.00f	0.00f	0.00h	0.00h	0.00h	0.00h

注:同行不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant difference among different treatments at the same stage ($P < 0.05$).



注:不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference among different treatments at the same stage ($P < 0.05$). The same below.

图 1 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 3 节间穿刺强度

Fig.1 The third internode rind puncture strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

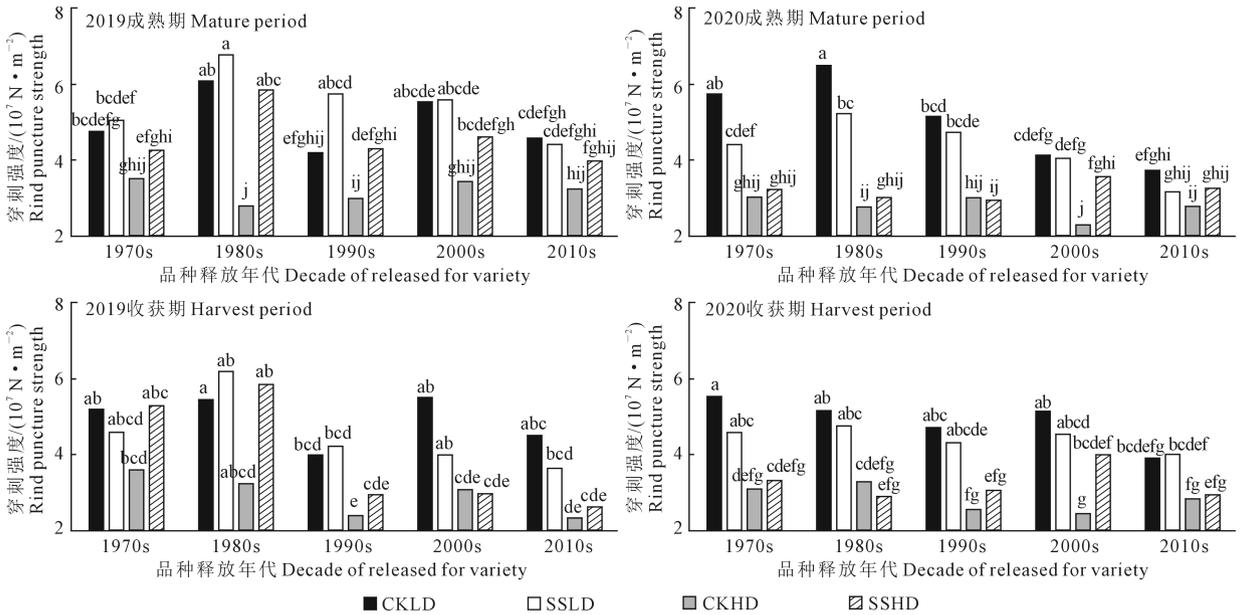


图 2 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 4 节间穿刺强度

Fig.2 The fourth internode rind puncture strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

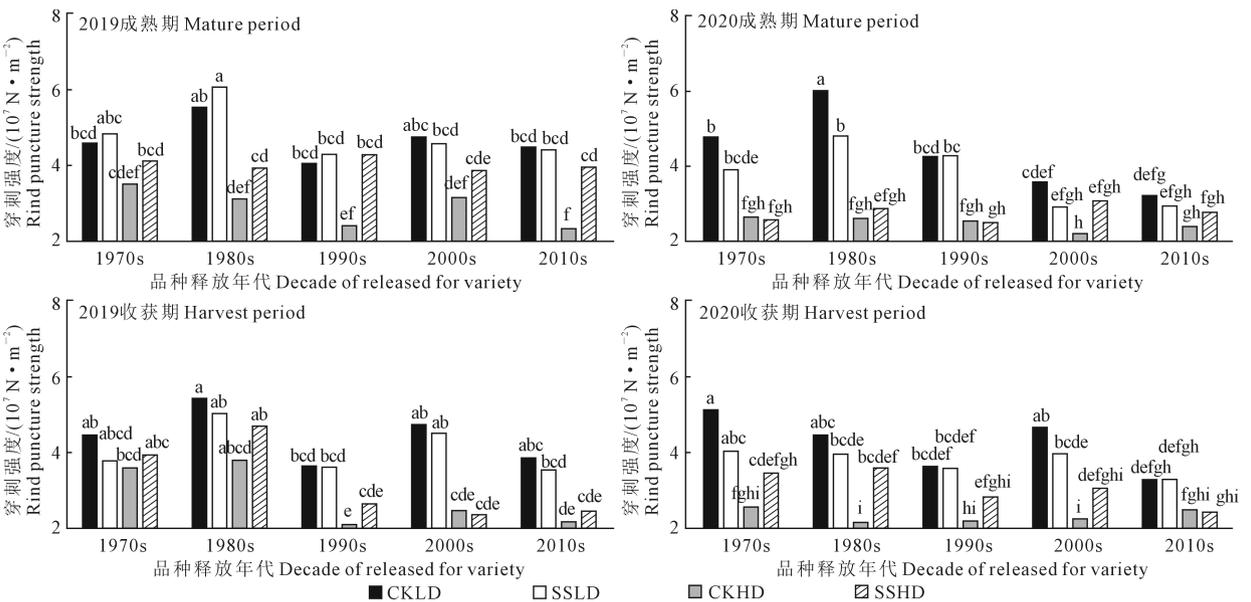


图 3 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 5 节间穿刺强度

Fig.3 The fifth internode rind puncture strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

耕作×密度对成熟期压碎强度有明显影响(表 5)。1990s、2000s 品种(2019 年)、收获期 1980s 和 1990s 品种(2020 年)SSLD 成熟期的压碎强度显著高于 CKLD。各年代品种成熟期压碎强度均低于 CKLD,2000s 品种 SSHD 压碎强度高于 CKHD 115.45%(2020 年);收获期 SSHD 下 1980s、1990s 品种压碎强度(2019 年)较 CKLD 无明显下降;且 1970s、1990s 品种的压碎强度分别高于 CKHD

43.6%(2020 年)、72.60%(2019 年)(图 4)。

耕作措施、种植密度、品种及其互作(除耕作×密度外)对玉米茎秆第 3 节间弯曲强度有明显影响;种植密度、品种对第 5 节间弯曲强度也有明显影响。SS 较 CK 可明显增加玉米茎秆第 3、5 节间的弯曲强度;HD 节间弯曲强度较 LD 显著降低。随着品种的演替,第 3、5 节间弯曲强度无明显变化规律(表 5)。

表 5 2019—2020 年耕作措施、密度、品种对玉米茎秆压碎强度和弯曲强度影响的方差分析
Table 5 Analysis of variance about effects of tillage method, density and variety on maize stalk crushing strength and bending strength in 2019 and 2020

指标 Indicator	第 4 节间压碎强度/(10 ⁶ N · m ⁻²) The fourth internode crushing strength						第 3 节间弯曲强度/(10 ⁶ N · m ⁻²) The third internode bending strength						第 5 节间弯曲强度/(10 ⁶ N · m ⁻²) The fifth internode bending strength					
	成熟期 Mature period		收获期 Harvest period		成熟期 Mature period		收获期 Harvest period		成熟期 Mature period		收获期 Harvest period		成熟期 Mature period		收获期 Harvest period			
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020		
SS	2.70	2.64	2.57	2.83	8.53	8.53	7.77	7.25	7.69	5.97	5.85	4.83						
CK	2.09	2.60	2.34	2.36	7.81	7.72	6.56	6.46	6.07	6.12	5.42	4.39						
LD	3.28	3.77	3.07	3.24	11.60	11.97	9.86	10.13	9.61	8.64	7.21	6.54						
HD	1.52	1.47	1.83	1.94	4.73	4.28	4.47	3.58	4.15	3.45	4.06	2.68						
1970s	2.16	2.80	2.29	2.62	7.96	7.51	7.13	6.94	6.15	6.37	6.16	4.76						
1980s	2.33	2.60	2.57	2.57	7.00	7.86	6.88	7.11	8.12	6.42	6.41	5.35						
1990s	2.51	2.75	2.35	2.34	7.56	8.23	6.38	7.32	7.50	6.81	5.85	5.21						
2000s	2.39	2.79	2.69	2.75	9.52	9.19	7.81	6.59	6.33	6.51	5.15	3.62						
2010s	2.60	2.16	2.37	2.68	8.81	7.83	7.61	6.33	6.28	4.10	4.21	4.09						
Slope /(10 ⁶ N · m ⁻² · decade ⁻¹)	0.09	-0.11	0.03	0.03	0.42	0.19	0.19	-0.17	-0.15	-0.44	-0.55	-0.31						
R ²	0.77	0.42	0.07	0.08	0.45	0.23	0.27	0.48	-0.08	0.41	0.76	0.40						
因素 Source																		
耕作措施 Tillage method (T)	**	ns	ns	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	ns	ns	**	**		
密度 Density (D)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
耕作×密度 T×D	**	**	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	ns	ns	ns		
品种 Variety (V)	ns	ns	ns	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
耕作×品种 T×V	ns	ns	ns	ns	*	**	**	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	**	**		
密度×品种 V×D	ns	ns	ns	ns	**	**	**	**	*	ns	ns	**	ns	ns	**	**		
耕作×密度×品种 T×D×V	ns	ns	ns	ns	*	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**		

进一步分析,由图 5、图 6 可知,1980s 品种第 3 节间弯曲强度在成熟期、收获期 SSLD 明显高于 CKLD 8.03% (2019 年) 和 23.49% (2 a 平均);2000s 品种第 5 节间弯曲强度在成熟期、收获期 SSLD 明显高于 CKLD 42.28% (2019 年)、79.65% (2020 年)。不同年代品种第 3、5 节间弯曲强度 SSHD 均小于 CKLD,但部分品种高于 CKLD。以第 3 节间弯曲强度为例(图 5),1970s、1980s、1990s、2000s 品种成熟期 SSHD 弯曲强度高于 CKHD,且 1980s、

1990s、2000s 品种的收获期 SSHD 弯曲强度仍分别高于 CKHD 88.07% (2 a 平均)、31.07% (2020 年)、58.09% (2020 年)。1980s、2000s 品种成熟期第 5 节间弯曲强度 SSHD 高于 CKHD,收获期 1970s、1980s 品种弯曲强度 SSHD 仍高于 CKHD 33.05% (2020 年)、98.37% (2019 年)(图 6)。

综上所述,在增密条件下深松耕作较浅旋可提高玉米茎秆压碎强度、弯曲强度,但不同年代品种响应无明显规律。

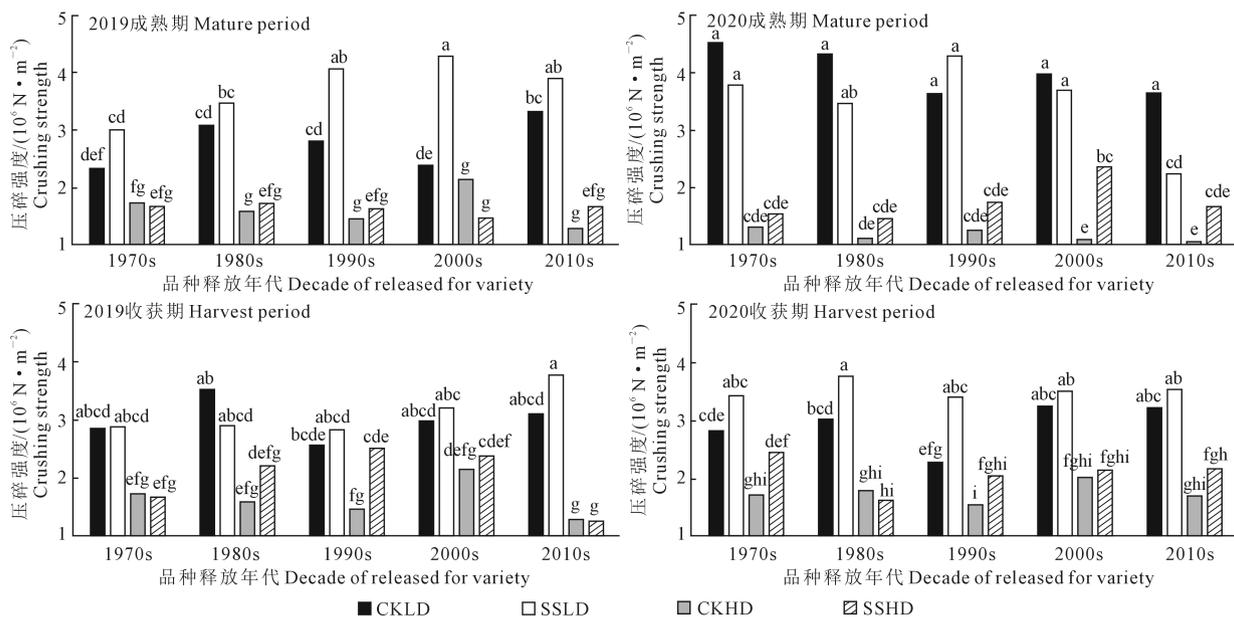


图 4 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 4 节间压碎强度

Fig.4 The fourth internode crushing strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

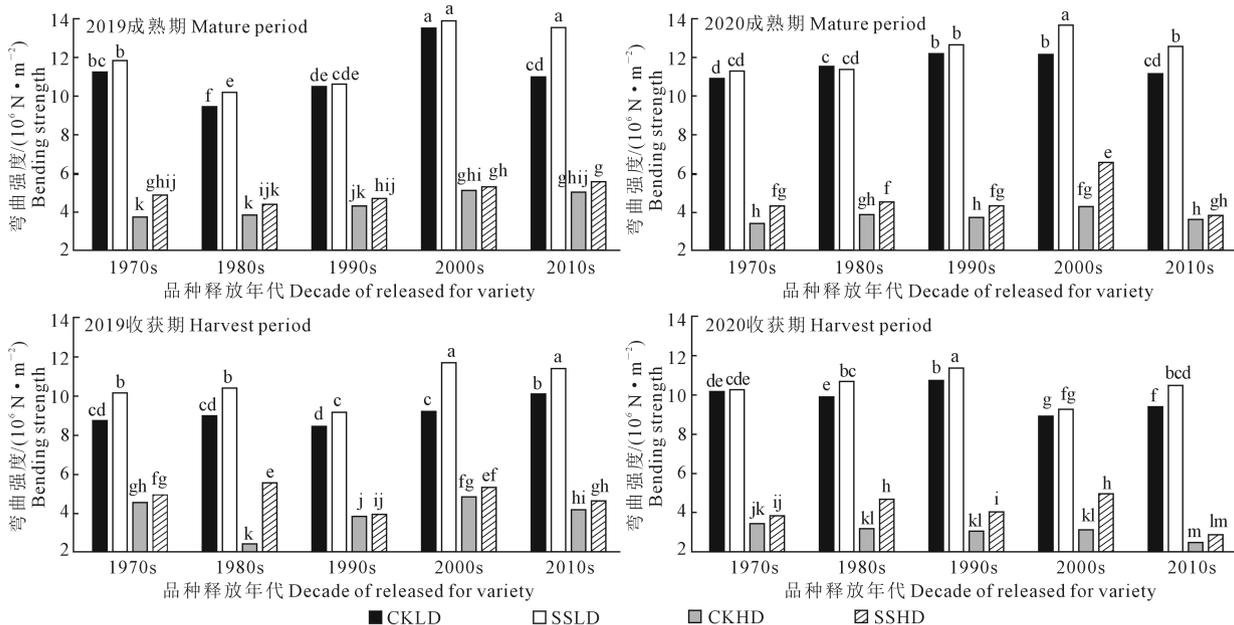


图 5 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 3 节间弯曲强度

Fig.5 The third internode bending strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

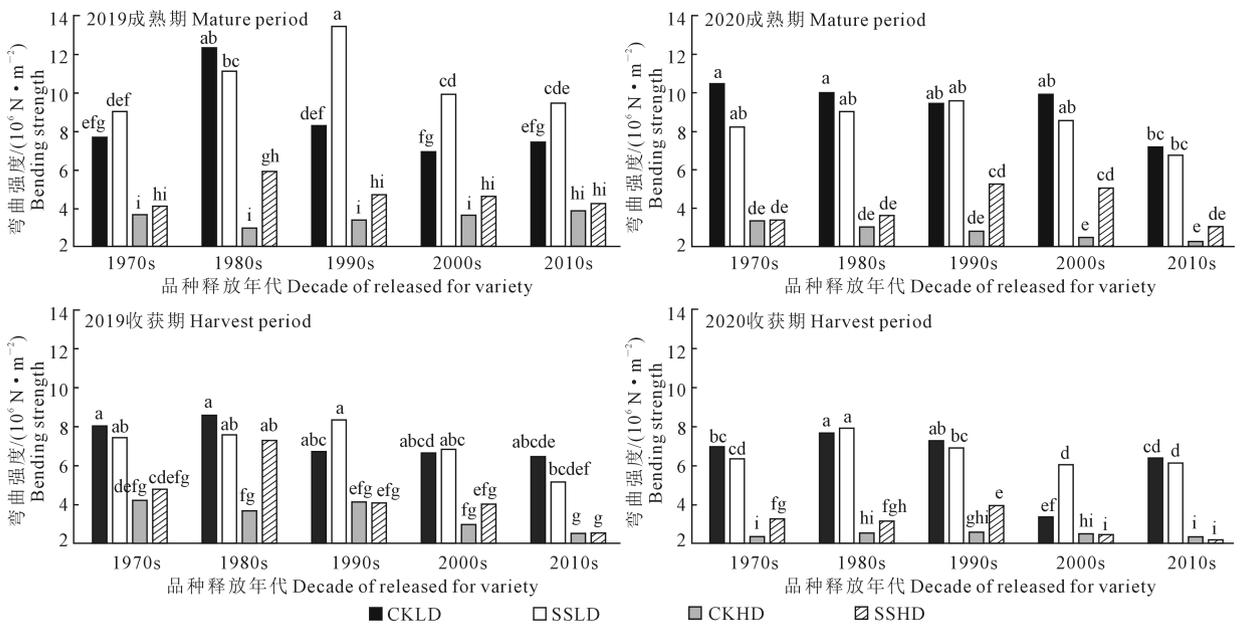


图 6 2019—2020 年深松、增密条件下不同年代品种的基部第 5 节间弯曲强度

Fig.6 The fifth internode bending strength of different varieties under subsoiling tillage and density increase in 2019 and 2020

2.4 茎秆力学强度与茎折率的相关性分析

由表 6 可知,2020 年成熟期的玉米茎折率与第 3、4、5 节间穿刺强度、第 4 节间压碎强度、第 3、5 节间弯曲强度有显著负相关关系;2020 年收获期的茎折率与第 3、4 节间穿刺强度、第 4 节间压碎强度、第 3、5 节间弯曲强度有显著负相关关系。

3 讨论

玉米生理成熟后由于植株不断衰老,碳水化合物分解、细胞壁降解导致茎秆力学强度降低、茎折率随之升高^[18-19]。本研究结果显示收获期玉米茎折率高于成熟期,且茎秆力学强度也相应下降。

刘志铭等^[13]研究吉林省不同年代玉米主栽品种生理成熟后抗倒伏特性的结果显示,基部第 3 节间茎秆穿刺强度和第 4 节间茎秆压碎强度都随品种更替而增加,子粒成熟后田间站秆期间植株抗倒伏能力提高。本研究中随着玉米品种的更替,收获期茎折率以 $2.21\% \cdot 10a^{-1}$ 的速率明显降低,茎秆力学指标无明显变化规律。与前人研究结果的差异可能由于试验条件不同所致,本研究中深松改土措施使耕层变厚,新老品种茎秆力学强度对此响应有差异,从而区别于单一耕作条件的结果。

于晓芳等^[16,20]认为深松耕作能提高土壤质量,使玉米根系空间分布更加合理,有利于地上部物质积累,可降低由增密引起的茎倒伏。本研究结果与

表 6 茎折与茎秆力学强度的相关分析

Table 6 Correlation analysis between stalk lodging and stalk mechanical strength

指标 Indicator	成熟期茎折率 Stalk lodging at mature period		收获期茎折率 Stalk lodging at harvest period	
	2019	2020	2019	2020
第 3 节间穿刺强度 The third internode rind puncture strength	-0.084	-0.277*	-0.061	-0.312*
第 4 节间穿刺强度 The fourth internode rind puncture strength	-0.245	-0.260*	-0.008	-0.274*
第 5 节间穿刺强度 The fifth internode rind puncture strength	-0.166	-0.262*	-0.074	-0.204
第 4 节间压碎强度 The fourth internode crushing strength	-0.314*	-0.385**	-0.385**	-0.418**
第 3 节间弯曲强度 The third internode bending strength	-0.433**	-0.491**	-0.476**	-0.475**
第 5 节间弯曲强度 The fifth internode bending strength	-0.365**	-0.344**	-0.225	-0.383**

注: *、** 分别表示指标间显著相关与极显著相关。

Note: *, ** mean significant correlation and extremely significant correlation between indicators respectively.

前人相一致,且老品种茎折率的降幅大于新品种,但2000s、2010s品种生理成熟后的茎折率均低于5%,可适宜机械化籽粒直收^[4]。深松耕作较浅旋耕可提高玉米茎秆的力学强度,增密后作用更加明显,且对不同年代玉米品种的影响有差异。本研究高密条件下,与浅旋耕相比,深松耕作使收获期1970s品种第4节间压碎强度增加了43.6%、第5节间弯曲强度增加了33.05%;1980s品种第3~5节间穿刺强度、第3、5节间弯曲强度也均有不同程度增加;1990s品种的第4节间压碎强度增加了72.60%,第3节间弯曲强度增加了31.07%;2000s品种第3~5节间茎秆穿刺强度、第3节间弯曲强度也有明显增加;2010s品种力学强度无显著变化。茎秆力学强度的增幅随着品种演替并无明显变化规律。

收获期(2020年)玉米的茎折率与第3、4节间穿刺强度、第4节间压碎强度、第3、5节间弯曲强度有明显负相关关系,这与薛军等^[6]研究结果相一致,但新品种的茎秆力学强度并非显著高于老品种。由此可见,力学强度可作为构建抗倒伏群体的指标,但评价品种的抗倒性还具有一定片面性。

4 结 论

从生理成熟到收获,玉米的茎折率增加,茎秆力学强度降低。与浅旋相比,深松耕作使玉米茎折率降低1.22个百分点,而增密使玉米茎折率增加7.77个百分点;随着品种更替,玉米收获期茎折率明显降低;深松耕作可以降低由增密引发的茎折,且老品种茎折率的降幅大于新品种。

随着品种更替,玉米茎秆力学强度无明显变化规律。深松耕作提高了茎秆力学强度,在高密条件下作用更加明显,除2010s品种外,其他年代品种的茎秆力学强度较浅旋耕作均明显增加;但增幅随着品种演替并无明显变化规律。

玉米茎折率与第3、4节间穿刺强度、第4节间压碎强度、第3、5节间弯曲强度呈显著负相关,但新品种茎秆力学强度并非明显高于老品种。因此,仅用单个或几个茎秆力学指标评价玉米品种的抗茎折能力具有片面性,后续研究更应该关注综合评价指标体系的构建。

参 考 文 献:

[1] MA D L, XIE R Z, ZHANG F L, et al. Genetic contribution to maize yield gain among different locations in China[J]. *Maydica*, 2015, 60(1): 1-8.

[2] RIZZO G, MONZON J P, TENORIO F A, et al. Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(4): e2113629119.

[3] 王克如, 李少昆. 玉米机械收获破碎率研究进展[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2018-2026.

WANG K R, LI S K. Progresses in research on grain broken rate by mechanical grain harvesting[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2018-2026.

[4] 薛军, 董鹏飞, 胡树平, 等. 玉米倒伏对机械收获损失的影响及倒伏减损收获技术[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6): 116-120, 126.

XUE J, DONG P F, HU S P, et al. Effect of lodging on maize grain loss and loss reduction technology in mechanical grain harvest [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(6): 116-120, 126.

[5] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941-1959.

LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959.

[6] 薛军, 王群, 李璐璐, 等. 玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素[J]. *作物学报*, 2018, 44(12): 1782-1792.

XUE J, WANG Q, LI L L, et al. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(12): 1782-1792.

[7] 丰光, 刘志芳, 李妍妍, 等. 玉米茎秆耐穿刺强度的倒伏遗传研究[J]. *作物学报*, 2009, 35(11): 2133-2138.

FENG G, LIU Z F, LI Y Y, et al. Genetics of lodging in tolerance to maize stem puncture [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11): 2133-2138.

[8] 勾玲, 赵明, 黄建军, 等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究[J]. *作物学报*, 2008, 34(4): 653-661.

GOU L, ZHAO M, HUANG J J, et al. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 653-661.

[9] ROBERTSON D, SMITH S, GARDUNIA B, et al. An improved method for accurate phenotyping of corn stalk strength[J]. *Crop Science*, 2014, 54(5): 2038-2044.

[10] ROBERTSON D J, LEE S Y, JULIAS M, et al. Maize stalk lodging: flexural stiffness predicts strength[J]. *Crop Science*, 2016, 56(4): 1711-1718.

[11] MA D L, XIE R Z, YU X F, et al. Historical trends in maize morphology from the 1950s to the 2010s in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(8): 2159-2167.

[12] MA D L, XIE R Z, LIU X, et al. Lodging-related stalk characteristics of maize varieties in China since the 1950s [J]. *Crop Science*, 2014, 54(6): 2805-2814.

[13] 刘志铭, 赵泰然, 张晓龙, 等. 吉林省不同年代主栽玉米品种生理成熟后的抗倒伏特性[J]. *玉米科学*, 2021, 29(6): 90-96.

LIU Z M, ZHAO T R, ZHANG X L, et al. Lodging resistance of maize varieties in different ages in Jilin Province [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(6): 90-96.

[14] CAI H G, MA W, ZHANG X Z, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize [J]. *The Crop Journal*, 2014, 2(5): 297-307.