广东农业科学 2021，48（2）：1–10
Guangdong Agricultural Sciences DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2021.02.001

刘学锐，于青松，窦克磊，郭雪云，姚丹丹，郝茹雪，张萌，杨晴 . 种植密度对冀东地区春玉米灌浆和脱水的影响［J］. 广东农业科学，2021，48（2）：1–10.

种植密度对冀东地区春玉米灌浆和脱水的影响

刘学锐[1]，于青松[1]，窦克磊[1]，郭雪云[1]，姚丹丹[1]，郝茹雪[1]，张　萌[1]，杨　晴[1,2]

（1. 河北科技师范学院农学与生物科技学院，河北 秦皇岛 066600；
2. 河北省作物逆境生物学重点实验室，河北 秦皇岛 066600）

摘　要：【目的】研究不同种植密度对春玉米灌浆、脱水和产量性状的影响，为冀东地区春玉米高密度种植、提高产量提供科学依据。【方法】选用前期筛选出的立杆特性良好的宜机收品种（京农科 728 和 MC812）进行耐密性试验，研究不同种植密度（60 000、67 500、75 000、82 500、90 000 株 /hm²）对灌浆、脱水和产量性状的影响。【结果】随着种植密度增加，两个春玉米品种的穗数和产量基本呈上升趋势，均在 90 000 株 /hm² 种植密度下达到最大值；籽粒在灌浆期间百粒重表现出“慢 – 快 – 慢”S 型上升趋势，灌浆速率和脱水速率都表现出先升后降的单峰曲线，且到达峰值的时间和变化趋势一致，峰值均出现在吐丝后 26 d。茎秆和苞叶脱水速率出现先降后升的变化趋势，最大脱水速率和灌浆速率出现在 60 000~75 000 株 /hm² 种植密度；随着吐丝天数增加，两个品种籽粒、茎秆和苞叶的含水率整体上均表现出“慢 – 快 – 慢”下降趋势，且 60 000~75 000 株 /hm² 种植密度下的含水率比 82 500~90 000 株 /hm² 种植密度低。【结论】为保证冀东地区春玉米高产，建议种植密度为 90 000 株 /hm²。

关键词：种植密度；春玉米；含水率；灌浆速率；脱水速率；冀东地区

中图分类号：S513　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004–874X（2021）02–0001–10

Effect of Planting Density on Grouting and Dehydration of Spring Maize in Eastern Hebei Province

LIU Xuerui[1], YU Qingsong[1], DOU Kelei[1], GUO Xueyun[1],
YAO Dandan[1], HAO Ruxue[1], ZHANG Meng[1], YANG Qing[1,2]

（1.*College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao* 066600, *China;*
2. *Hebei Key Labortary of Crop Stress Biology, Qinhuangdao* 066600, *China*）

Abstract:【Objective】The effects of different planting densities on spring maize grouting, dehydration and yield characters were studied to provide scientific basis for high–density planting and yield increase of spring maize in eastern Hebei Province.【Method】The good varieties （Jingnongke 728 and MC812） with appropriate poling characteristics and suitable for mechanical harvesting screened in early stage were selected to conduct tightness resistance test, and five planting densities（60 000 plants/hm², 67 500 plants/hm², 75 000 plants/hm², 82 500 plants/hm² and 90 000 plants/hm²） were set. The effects of different planting densities on grouting, dehydration and yield characters were studied.【Result】With the increase of plating density, the spike number and yield of the two varieties showed an increasing trend, and both reached the maximum under the density of 90 000 plants/hm². The 100–grain weight of seeds showed a S–shaped（ “slow–fast–

收稿日期：2020–08–17
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFD0300506）
作者简介：刘学锐（1997—），男，在读硕士生，研究方向为作物栽培生理，E–mail：liuxueruide@163.com
通信作者：杨晴（1974—），女，硕士，教授，研究方向为玉米栽培生理，E–mail：yangqingxy@163.com

slow”）upward trend during grain filling, the grain filling rate and dehydration rate showed a single-peak curve of“first rising then falling”, and the time to reach the peak value was consistent with the changing trend, and the peak value appeared on the 26th day after spinning. The rates of stem and bract dehydration showed a trend of decreasing first and then increasing. The maximum dehydration rate and filling rate appeared at the planting density of 60 000-75 000 plants/hm^2.With the increase of silking days, the moisture contents of seeds, stems and bracts of the two varieties showed a“slow-fast-slow”decreasing trend on the whole, and the moisture content under the planting density of 60 000-75 000 plants/hm^2 was lower than that of 82 500-90 000 plants/hm^2.【Conclusion】To ensure high yield of spring maize in eastern Hebei Province, it is suggested that the planting density is 90 000 plants/hm^2.

Key words: planting density; spring maize; moisture content; grain filling rate; dehydration rate; eastern Hebei Province

【研究意义】种植密度对玉米产量及产量相关性状有明显影响，在一定范围内提高玉米品种的耐密性可提高玉米产量[1-2]。随着单位面积内群体数量的增加，玉米的群体产量得到提高，特别是穗数增加使玉米产量提高。但是产量并非随种植密度增加呈直线上升，当种植密度达到某一程度后产量会呈现下降趋势[3-5]。故本实验通过调整玉米种植密度确定种植密度对玉米产量、灌浆速率和脱水速率的影响。【前人研究进展】灌浆特性是玉米生长发育的重要指标，灌浆期的长短对籽粒干物质累积有重要影响，一直保持较高灌浆速率能够得到较高的粒重和产量[6]。相同密度条件下，穗粒数和粒重是实现玉米高产的关键因素，籽粒灌浆速率和灌浆时间共同决定品种粒重大小[7-9]。付晋峰等[10]认为，提高栽植密度可降低玉米的灌浆速率，密度对玉米灌浆速率的影响主要表现在灌浆后期。高密度下，单株所截获的光能降低，形成光合产物量降低，并且由于群体竞争加剧，灌浆后期的营养供应和同化物供应不足，产生对粒重建成的不利影响。玉米的灌浆、脱水速率直接影响成熟期籽粒中的水分含量[11]。前人研究表明，籽粒中的水分含量主要与温度有关，而栽植密度对其影响不大[10-13]。【本研究切入点】如何通过调控种植密度，协调好籽粒灌浆速率、灌浆时间与脱水速率之间的关系是实现机械化籽粒直收技术的关键所在。王萌等[12]研究表明，粒重随灌浆速率的提高而增加，且干物质的积累受其影响，最后影响产量。灌浆速率随栽植密度的提高有所降低[13]。【拟解决关键问题】本试验通过研究不同种植密度对春玉米灌浆、脱水和产量性状的影响，提出冀东地区春玉米高产适宜的种植密度。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018—2019年在河北科技师范学院昌黎试验田进行。试验地质地为中壤，播种前采土样测定土壤中有机质含量为19.08 g/kg，碱解氮含量为102.35 mg/kg，速效磷含量为23.59 mg/kg，速效钾含量为74.10 mg/kg。

供试品种为京农科728和MC812。

1.2 试验方法

试验采用裂区设计，密度为主区，品种为副区。其中，密度设5个水平，即60 000、67 500、75 000、82 500、90 000株/hm^2，株距58 cm，采用随机区组设计，3次重复，6行区，9 m行长。人工点播播种，田间管理同当地生产田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 *产量测定* 在玉米成熟期，每个小区选取有代表性的1个样点，每个样点大小为3 m双行，记录样点内的空秆株数、双穗株数、总株数、穗粒重，计算收获穗数、测定每667 m^{2}产量。

玉米收获穗数=种植密度×（1+双穗率-空秆率）

1.3.2 *灌浆参数* 吐丝前选择生长健壮一致且具有代表性的植株标记。自吐丝后5 d起开始取样，每隔7 d取样1次，直至成熟；成熟后每隔4 d取样1次，直至籽粒含水率降到13%以下。每次从各小区选取3个果穗，每穗取中部籽粒，共100粒。在室内测得百粒鲜重、干重和体积，计算百粒籽粒、茎秆和苞叶含水率、灌浆速率和脱水速率等指标。

不同部位含水率=〔相应部分鲜重（g）-相应部位干重（g）〕/〔籽粒鲜重（g）×100%〕

籽粒灌浆速率=〔后一次籽粒干重（g）-前一次籽粒干重（g）〕/〔两次取样相隔天数（d）〕

籽粒脱水速率=〔前一次籽粒含水率（%）–后一次籽粒含水率（%）〕/〔两次取样相隔天数（d）〕

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26.0 进行数据处理与分析，试验数据均为两年数据平均值。

2 结果与分析

2.1 种植密度对玉米产量影响

从表 1 可以看出，随着种植密度增加，两个玉米品种穗数和产量变化整体呈现出上升趋势，均在 90 000 株 /hm² 种植密度下达到最大值，但产量并不是随着种植密度增加保持稳步增加。穗粒数和千粒重则随着种植密度增加大出现下降趋势，且京农科 728 和 MC812 的千粒重均在 60 000 株 /hm² 种植密度下最大，分别为 289.12、325.03 g。京农科 728 在 60 000 株 /hm² 种植密度下，产量出现最小值、8 791.93 kg/hm²，在 90 000 株 /hm² 种植密度下，产量达到最大值、11 712.37 kg/hm²，较 60 000 株 /hm² 密度产量增加 24.93%，产量差异达到显著水平；MC812 在 67 500 株 /hm² 种植密度下，产量出现最小值 10 711.82 kg/hm²，在 90 000 株 /hm² 种植密度下，产量达到最大值、12 272.93 kg/hm²。较 67 500 株 /hm² 种植密度产量增加 12.72%，产量差异达到显著水平。

表 1 种植密度对玉米产量性状的影响

Table 1 Effects of planting density on yield characters of maize

品种 Variety	种植密度 Planting density（Plants/hm²）	穗粒数 Seed number per spike	穗数 Spike number	千粒重 Thousand seed weight（g）	产量 Yield（kg/hm²）
京农科 728 Jingnongke728	60000	512.07	59385	289.12	8791.93c
	67500	546.24	62260	281.70	9580.31b
	75000	536.66	68965	286.27	10595.07ab
	82500	494.36	71835	272.53	9678.18b
	90000	500.99	85245	274.25	11712.37a
MC812	60000	557.22	60345	325.03	10929.28b
	67500	549.27	68965	282.78	10711.82b
	75000	531.26	69925	294.65	10945.76b
	82500	495.86	81420	276.50	11163.11ab
	90000	465.52	87165	302.46	12272.93a

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after data in the same column represent significant differences.

2.2 种植密度对玉米籽粒百粒干重和灌浆速率的影响

图 1 显示，京农科 728 和 MC812 百粒干重表现出“慢 – 快 – 慢”的 S 型上升曲线。吐丝后 5~12 d，两个品种百粒干重开始出现上升趋势；吐丝后 12~40 d，上升趋势加快，均在 75 000 株 /hm² 密度下增长最快；吐丝后 40 d 直至成熟，京农科 728 和 MC812 的百粒干重分别在 90 000、82 500 株 /hm² 种植密度下增长最快。京农科 728 和 MC812 籽粒灌浆速率呈“先升后降”的单峰曲线。吐丝后 12~26 d，两个品种灌浆速率呈现出上升趋势，均在 67 500 株 /hm² 种植密度下达到最大灌浆速率，且最大值均出现在吐丝后 26 d，分别为 116.38、120.74 g/（百粒·d）；吐丝后 26~33 d，两个品种的灌浆速率趋于缓慢下降趋势，但是 82 500 株 /hm² 种植密度下的灌浆速率出现上升趋势；吐丝后 33~47 d，两个品种的灌浆速率趋于急速下降趋势，京农科 728 在 67 500 株 /hm² 种植密度下降趋势最快，MC812 在 75 000 株 /hm² 种植密度下下降最快；且吐丝后 40 d 直至成熟，两个品种均在 90 000 株 /hm² 种植密度下，保持较高的灌浆速率。

2.3 玉米灌浆速率与脱水速率的相关分析

从图 2 可以看出，利用线性回归方程 y=ax+b 对不同种植密度玉米的百粒重和灌浆速率的相关性进行拟合。结果表明，灌浆速率和脱水速率均呈正相关关系，即随着灌浆速率上升，脱水速率也呈上升趋势。MC812 和京农科 728 的相关系数 R^2 分别为 0.75~0.99 和 0.70~0.99。最大灌浆速率依次为 116.24、120.74、112.43、114.40 和 107.38g/（百粒· d），109.96、116.38、109.26、

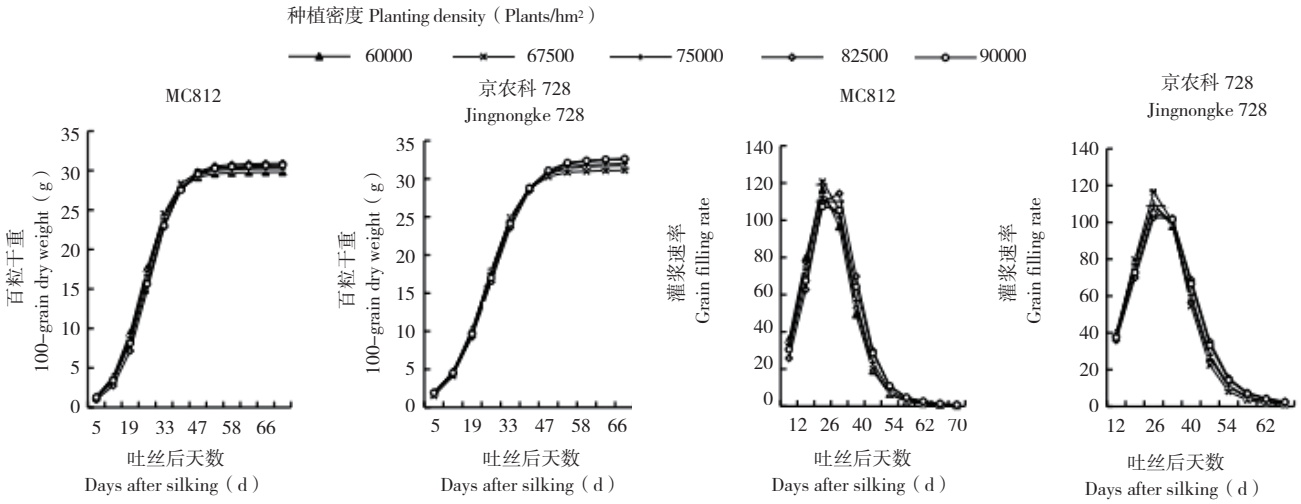


图 1　种植密度对玉米百粒干重和籽粒灌浆速率的影响

Fig. 1　Effects of planting density on 100-grain dry weight and grain filling rate of maize

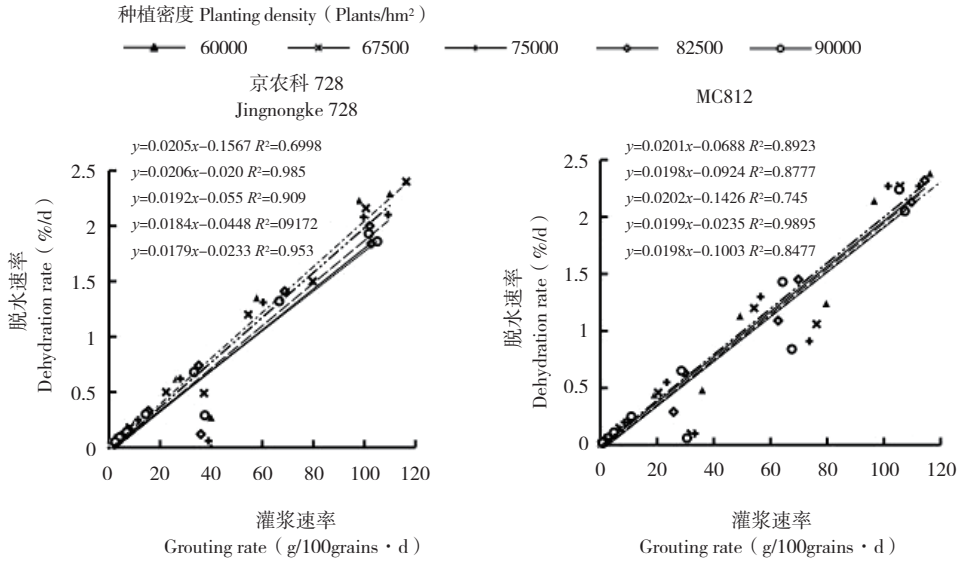


图 2　玉米灌浆速率与脱水速率的相关性

Fig. 2　Correlation between grain filling rate and dehydration rates of maize

102.06 和 101.71g/（百粒・d），此时相应的脱水速率依次为 2.38、2.37、2.27、2.32 和 2.24%/d，2.29、2.40、2.10、2.00、1.93%/d。

2.4　种植密度对玉米籽粒、茎秆和苞叶含水率的影响

随着吐丝天数的延长，玉米各部位含水率整体上均呈“慢－快－慢”下降趋势（表 2），高密度条件下含水率高于低密度。籽粒含水率变化表现尤为明显，其次是苞叶，最后是茎秆。两个品种籽粒含水率在吐丝后 5~12 d 变化幅度明显，12 d 后各密度下均无明显差异；京农科 728 在 60 000 株 /hm² 密度下，籽粒含水率下降最快，出现最小值；MC812 在 90 000 株 /hm² 密度下，籽粒含水率下降幅度最快，出现最小值。

两个品种在整个灌浆期保持较高的茎秆含水率，且整体变化趋势趋于一致。京农科 728 茎秆含水率无明显差异，且在 90 000 株 /hm² 密度下保持较高含水率；MC812 在 75 000 株 /hm² 密度下含水率出现最小值。两个品种苞叶含水率整体呈现下降趋势，并在吐丝后 47~62 d 出现差异，且均是在 67 500 株 /hm² 密度条件下含水率最高，90 000 株 /hm² 密度条件下含水率最低。观测整个灌浆期，67 500 株 /hm² 密度一直保持较高的含水率，60 000 株 /hm² 密度下，京农科 728 含水率较低，灌浆后期，90 000 株 /hm² 密度下的含水率下降缓慢，与其他密度相比含水率较高。茎秆与苞叶含

表 2　种植密度对玉米籽粒、茎秆和苞叶含水率的影响

Table 2　Effect of planting density on moisture content in maize grain, stem and bract

部位 Part	吐丝天数 Silking days（d）	MC812 种植密度 Planting density of MC812（Plants/hm²）					京农科种植密度 Planting density of Jingnongke 728（Plants/hm²）				
		60000	67500	75000	82500	90000	60000	67500	75000	82500	90000
籽粒 Grain	5	0.83	0.83	0.82	0.86	0.81	0.83	0.86	0.80	0.79	0.80
	12	0.81	0.82	0.81	0.84	0.81	0.80	0.83	0.80	0.78	0.77
	19	0.73	0.75	0.75	0.76	0.75	0.72	0.72	0.72	0.71	0.70
	26	0.56	0.58	0.59	0.61	0.61	0.56	0.56	0.57	0.58	0.57
	33	0.41	0.42	0.43	0.45	0.45	0.41	0.40	0.42	0.44	0.43
	40	0.33	0.34	0.34	0.35	0.35	0.31	0.32	0.33	0.35	0.34
	47	0.30	0.31	0.30	0.30	0.31	0.27	0.29	0.29	0.29	0.29
	54	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27
	58	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.25	0.27	0.27	0.26	0.27
	62	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.24	0.27	0.26	0.26	0.26
	66	0.28	0.29	0.28	0.28	0.28	0.24	0.27	0.26	0.26	0.26
茎秆 Stem	5	0.84	0.83	0.84	0.82	0.82	0.85	0.84	0.82	0.83	0.79
	12	0.82	0.82	0.81	0.78	0.79	0.82	0.83	0.82	0.82	0.84
	19	0.84	0.84	0.83	0.80	0.82	0.81	0.83	0.84	0.84	0.85
	26	0.85	0.86	0.85	0.84	0.84	0.86	0.86	0.85	0.85	0.86
	33	0.84	0.85	0.84	0.82	0.82	0.83	0.83	0.85	0.83	0.85
	40	0.83	0.80	0.80	0.79	0.79	0.81	0.82	0.81	0.79	0.79
	47	0.78	0.79	0.76	0.76	0.76	0.76	0.78	0.78	0.75	0.76
	54	0.75	0.77	0.72	0.77	0.71	0.74	0.76	0.74	0.73	0.74
	58	0.75	0.73	0.73	0.72	0.70	0.72	0.71	0.71	0.70	0.71
	62	0.73	0.72	0.73	0.72	0.71	0.75	0.72	0.71	0.72	0.73
	66	0.70	0.61	0.71	0.71	0.70	0.70	0.73	0.72	0.72	0.71
苞叶 Bract	5	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.85	0.85	0.85	0.83
	12	0.81	0.82	0.83	0.83	0.82	0.80	0.81	0.81	0.81	0.82
	19	0.81	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.81	0.81	0.81	0.81
	26	0.81	0.83	0.82	0.81	0.82	0.81	0.82	0.82	0.83	0.82
	33	0.76	0.76	0.77	0.76	0.77	0.76	0.72	0.76	0.77	0.76
	40	0.73	0.63	0.69	0.68	0.68	0.66	0.70	0.69	0.58	0.62
	47	0.50	0.60	0.57	0.48	0.52	0.47	0.50	0.51	0.46	0.45
	54	0.44	0.53	0.42	0.47	0.35	0.43	0.44	0.38	0.42	0.32
	58	0.39	0.41	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.43
	62	0.45	0.45	0.48	0.41	0.42	0.46	0.48	0.43	0.45	0.41
	66	0.41	0.32	0.38	0.37	0.38	0.40	0.42	0.37	0.39	0.37

水率在吐丝后 12~26 d 和 54~62 d 出现上升趋势，结合当时的天气状况，期间有降雨出现，气温降低，空气湿度增加，推测苞叶含水率可能与气象因素有关。

2.5　种植密度对玉米籽粒、茎秆和苞叶脱水速率影响

随着吐丝天数增加，籽粒脱水速率呈现先升后降的单峰曲线，而茎秆和苞叶脱水速率则整体呈现出先降后升趋势，且趋势变化十分明显。两个品种籽粒脱水速率均在吐丝后 26 d 达到最大值，京农科 728 最大脱水速率出现在 67 500 株 /hm² 种植密度条件下，为 2.4%/d；MC812 最大脱水速率出现在 60 000 株 /hm² 种植密度条件下，为 2.38%/d，其次是 67 500、75 000 株 /hm² 种植密度，分别为 2.37、2.27%/d。吐丝后的 26~33 d 内，两个玉米品种脱水速率均在低种植密度条件下开始缓慢下降，高密度 82 500、90 000 株 /hm² 条件下还在缓慢上升。吐丝后 33 d 开始，脱水速率急剧降低，

直至吐丝后 47 d，降低趋势趋于平缓，成熟后变得更为平缓。高种植密度下的最大脱水速率出现稍晚，体现在吐丝后 33 d。两个玉米品种茎秆和苞叶脱水速率在吐丝后 12~26 d 和 62~66 d，脱水速率变化趋势随种植密度的变化均出现一定下降和上升趋势，趋势变化明显。在吐丝后 26~62 d 之间趋势变化没有规律性，波动性十分强烈，均在 60 000、67 500 株 /hm² 低种植密度下变化幅度大。京农科 728 在吐丝后 47 d，苞叶脱水速率出现最大值，为 2.82%/d，而茎秆脱水速率在吐丝后 58 d，出现最大值，为 1.17%/d；MC812 在吐丝后 62 d 茎秆和苞叶脱水速率出现最大值，分别为 1.46%/d 和 3.23%/d（图 3、图 4）。

2.6 玉米籽粒、茎秆与苞叶含水率相关分析

利用线性回归方程 $y=ax+b$ 对不同种植密度的籽粒、茎秆和苞叶含水率的相关性进行拟合。结果表明，不同种植密度下，两品种籽粒、茎秆和苞叶含水率之间均呈正相关关系，即随着籽粒含水率降低，茎秆和苞叶的含水率呈下降趋势。京农科 728 和 MC812 的籽粒与茎秆、籽粒与苞叶和茎秆与苞叶的相关系数 R^2 范围分别为 0.51~0.71、0.16~0.29，0.74~0.85、0.61~ 0.75，0.83~0.94、0.61~0.75（图 5~ 图 7）。

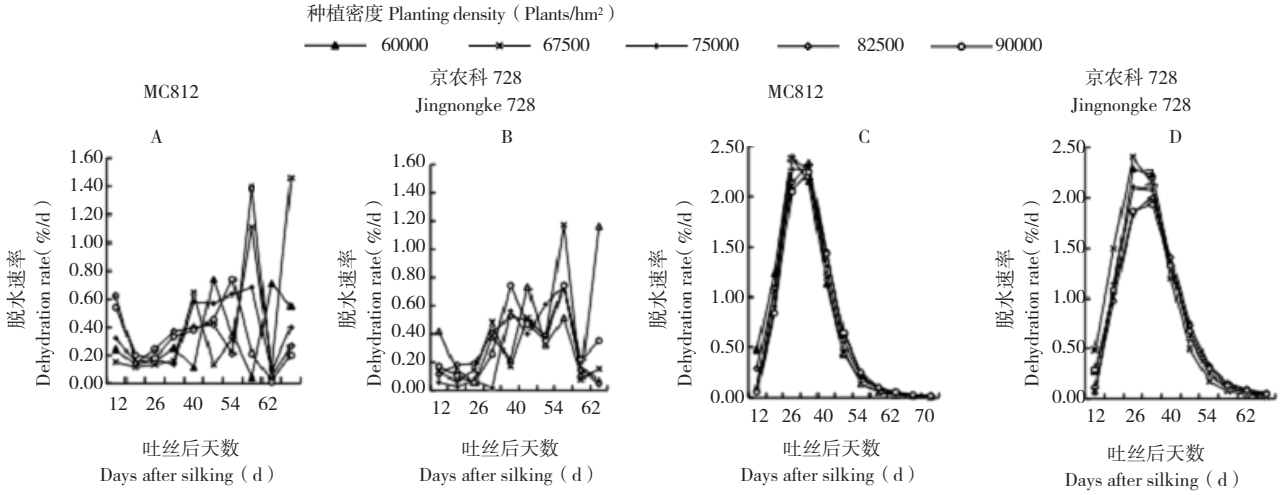


图 3 种植密度对玉米茎秆（A、B）和籽粒（C、D）脱水速率的影响

Fig. 3 Effect of planting density on dehydration rates of maize stem（A、B）and grain（C、D）

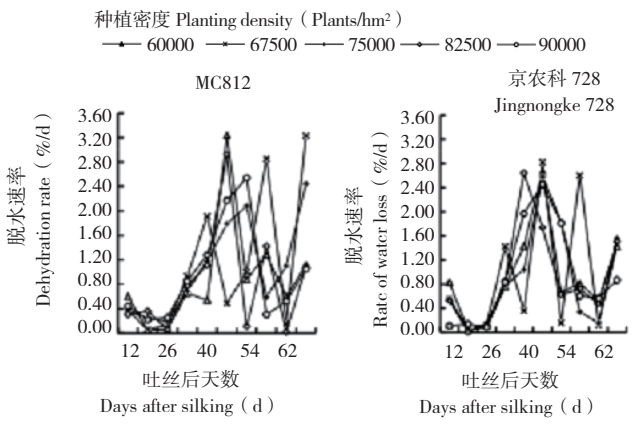


图 4 种植密度对玉米苞叶脱水速率的影响

Fig. 4 Effect of planting density on dehydration rate of maize bract

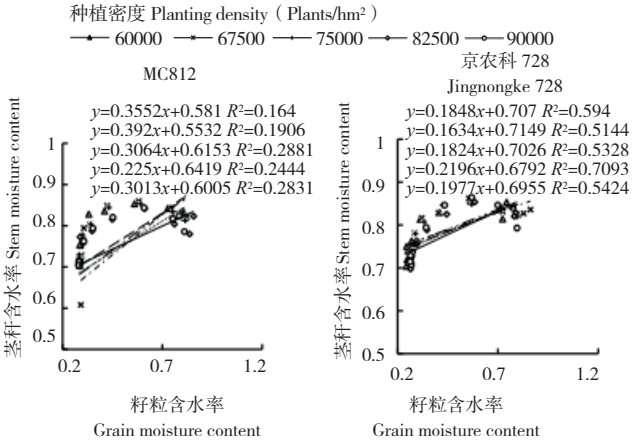


图 5 玉米籽粒含水率与茎秆含水率的相关性

Fig. 5 Correlation between moisture contents of maize grain and stem

2.7 玉米植株含水量与气象数据的相关分析

对含水量与气象数据进行相关性分析，结果（表 3）显示，各种植密度条件下，降水与籽粒含水量之间均无显著相关性；降水与茎秆、苞叶含水量在高密度条件下呈显著正相关，低种植密度条件无显著相关性；气温与籽粒、苞叶含水率之间呈极显著正相关，与茎秆含水率之间呈显著

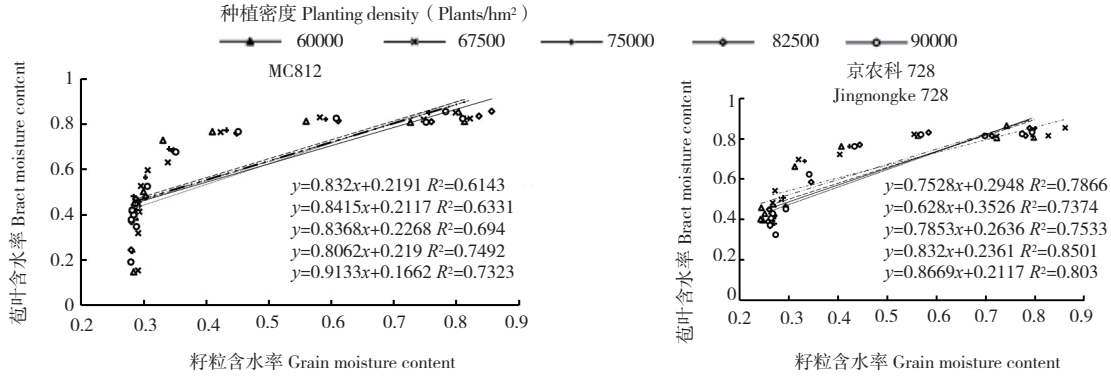


图 6　玉米籽粒与苞叶含水率的相关性

Fig. 6　Correlation between moisture contents of grain and bract of maize

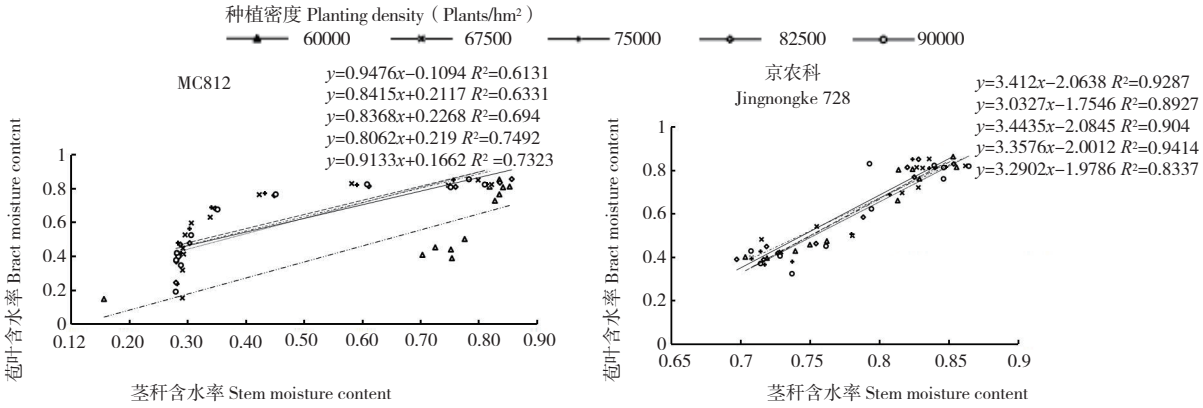


图 7　玉米茎秆与苞叶含水率的相关性

Fig. 7　Correlation between moisture contents of stem and bract of maize

表 3　玉米植株含水量与气象数据的相关分析

Table 3　Correlation analysis of maize plant moisture content and meteorological data

部位 Parts	种植密度 Planting density（Plants/hm²）	京农科 728Jingnongke 728			MC812		
		降水 Precipitation	气温 Temperature	湿度 Humidity	降水 Precipitation	气温 Temperature	湿度 Humidity
籽粒 Grain	60000.00	0.39	0.83**	0.63*	0.39	0.83**	0.63*
	67500.00	0.30	0.79**	0.60	0.30	0.79**	0.60*
	75000.00	0.36	0.81**	0.63*	0.36	0.81**	0.30*
	82500.00	0.38	0.81**	0.65*	0.38	0.82**	0.65*
	90000.00	0.36	0.81**	0.64*	0.36	0.81**	0.64*
茎秆 Stem	60000.00	0.54	0.69*	0.84**	0.54	0.69*	0.84**
	67500.00	0.53	0.68*	0.76**	0.53	0.68*	0.76**
	75000.00	0.64*	0.67*	0.77**	0.64*	0.67*	0.77**
	82500.00	0.62*	0.70*	0.79**	0.62*	0.70*	0.79**
	90000.00	0.74**	0.71*	0.80**	0.74**	0.71*	0.80**
苞叶 Bract	60000.00	0.57	0.73*	0.77**	0.57	0.73*	0.77**
	67500.00	0.51	0.77**	0.81**	0.51	0.77**	0.81**
	75000.00	0.56	0.75**	0.75**	0.56	0.75**	0.76**
	82500.00	0.62*	0.75**	0.79**	0.62*	0.75**	0.79**
	90000.00	0.60*	0.75**	0.71*	0.60*	0.75**	0.71*

注：*、** 分别表示差异显著和极显著。

Note：*and**represent significant difference and extremely significant difference, respectively.

正相关。在 67 500 株 /hm² 种植密度条件下，相对湿度与京农科 728 的籽粒含水量无显著相关性，与其他处理的籽粒含水量均呈显著正相关；在 90 000 株 /hm² 种植密度下，相对湿度和降水在京农科 728 与 MC812 的苞叶含水率之间均呈显著正相关。气温在京农科 728 和 MC812 的茎秆含水率之间呈显著正相关，与其他处理间均呈极显著正相关。

3 讨论

3.1 种植密度对玉米产量影响

增加玉米种植密度是促进增产的重要手段。种植密度对产量的限制体现在籽粒基数上，并非是单个玉米籽粒的重量。玉米种植密度的增加，提高了群体产量，特别是穗数的提高使产量得到一定程度的提高。但是产量却没有随着密度增加而增加。随种植密度增加，不同品种籽粒灌浆期缩短，平均灌浆速率降低，籽粒生理成熟时的含水率降低。合理增加种植密度能够显著提高不同熟期玉米产量[14]。大量研究表明[15-16]，产量并不是随种植密度增加呈直线上升的，当到达某一程度后不仅不会增加，还会呈下降趋势。该结论也与本课题组前期试验结论一致。崔丽娜等[17]研究发现，玉米产量随着密度的增加而增加，但增加规律不一致，在密度 90 000 株 /hm² 处理的玉米产量最大。焦浏[18]认为，随种植密度增加，穗粒数和千粒重降低。本研究结果表明，两玉米品种的产量和穗数随着种植密度增加而增加，但产量并不随种植密度增加保持稳步增加，千粒重和穗粒数随种植密度增加而减小，与前人研究结果一致。京农科 728 和 MC812 均在 90 000 株 /hm² 种植密度下，产量达到最大值，产量差异达到显著水平；MC812 产量差异达到显著水平。分析得出：京农科 728 和 MC812 在 60 000 株 /hm² 种植密度下，虽然千粒重最大，但产量却不是最高的，产量和穗数均在 90 000 株 /hm² 种植密度下达到最大值。说明穗数增加可以保证产量提高。

3.2 种植密度对玉米籽粒灌浆、脱水特性影响

灌浆期是籽粒干物质累积的时期，是生长发育的关键时期，干物质累积是高产的前提[19]。因此，玉米产量的形成受灌浆特性的显著影响。穗粒数和粒重是实现增产的重要指标，灌浆速率与干物质积累密切相关，对粒重和产量至关重要[7,20]。王萌等[12]研究表明，不同密度条件下，灌浆速率差异较小。付健等[20]研究表明，灌浆前期受栽植密度的影响较大，后期影响不明显，且随着栽植密度的提高有所下降。有研究提出，籽粒含水率和灌浆速率变化趋势相近[21-22]。

本试验结果表明，籽粒灌浆期间百粒重呈“慢 – 快 – 慢”S 型上升趋势，灌浆速率和脱水速率均呈“先升后降”的单峰曲线。各密度条件下，灌浆速率的峰值都出现在吐丝后 26 d 时。在 60 000~75 000 株 /hm² 种植密度下，灌浆速率与脱水速率到达峰值的时间一致，并且上升和下降的变化趋势波动较大；在 90 000 株 /hm² 密度下，脱水速率到达的峰值的时间较晚于灌浆速率。在灌浆速率下降期内，高密度下一直保持较高的灌浆速率，使得高密度条件下有较大的百粒重。杨克军[23]研究发现，籽粒灌浆速率高，成熟期脱水速度快，增产效果显著。玉米脱水速率直接影响后期籽粒收获质量，后期脱水快，能较早的到达收获期，籽粒破碎率随含水率的上升而增加[24,25]。本试验中，在脱水速率的下降期内，60 000~75 000 株 /hm² 密度下一直保持较高的脱水速率，有利于收获。苞叶和茎秆脱水速呈现“先降后升”的变化趋势，60 000~75 000 株 /hm² 密度下的变化幅度大于 82 500~90 000 株 /hm² 密度条件，而 90 000 株 /hm² 种植密度下出现较早。

3.3 种植密度和气象因素对玉米植株含水率影响

随着种植密度的提高，也加剧了植株对水分、光能等的争夺。刘胜群等[26]认为，茎秆含水率随着栽植密度的提高而降低。玉米群体数量增加，叶面积指数增加，叶片相互遮蔽，群体内通风透光条件下降，温度下降，湿度上升。付晋峰等[12]认为，籽粒含水率与气温有关。高尚等[27]提出成熟后的籽粒含水率受湿度、温度、降水等多个气象因素的影响。本研究结果表明，随着吐丝天数的增加，玉米籽粒、茎秆和苞叶的含水率整体上均呈“慢 – 快 – 慢”下降趋势，且 60 000~75 000 株 /hm² 低于 82 500~90 000 株 /hm² 种植密度，与前人研究结果一致。通过气象因素与含水量之间的相关性分析表明，降水对含水量的影响不大，但对高密度条件下的茎秆和苞叶含水率有一定的影响；气温和相对湿度是影响含水量的主要因素，尤其是与苞叶含水率密切相关；同时，气温与籽粒含水率、相对湿度与茎秆含水率也密切相关。

4 结论

在本试验设置的密度范围内，冀东地区春玉米产量基本随密度增加而增加，增加穗数可以保证春玉米高产。两品种子粒灌浆期间百粒重表现出“慢-快-慢”的S型上升曲线。籽粒脱水速率和灌浆速率均呈现“先升后降”的单峰曲线，而茎秆和苞叶脱水速率则整体呈现出“先降后升”的趋势，且趋势变化十分明显。籽粒灌浆速率与脱水速率到达峰值的时间和变化趋势保持一致，且灌浆速率和脱水速率之间呈显著正相关关系。因此，建议冀东地区春玉米种植密度为90 000株/hm^2。

参考文献（References）：

[1] 杨美丽，王帮太，程建梅，梅兹君，赵连峰，鹿红卫．不同种植密度对玉米新品种永优1573籽粒灌浆速率和脱水速率的影响[J]．现代农业科技，2019(21):17-19.
YANG M L,WANG B T,CHENG J M,MEI Z J,ZHAO L F,LU H W.Effects of different planting densities on grain fillingrate and dehydration rate of a new maize variety Yongyou1573[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(21):17-19.

[2] ALI F,AHSAN M,ALI Q,KANWAL N.Phenotypic stability of *Zea mays* grain yield and its attributing traits under drought stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017,8:1397.DOI:10.3389/fpls.2017.01397.

[3] DI MATTEO J A,FERREYRA J M,CERRUDO A A,ECHARTE L,ANDRADE F H.Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding[J]. *Field Crops Research*, 2016,197:107-116. DOI:10.1016/j.fcr.2016.07.023.

[4] CLAUDIA S D,DOMINGOS F F,JAIRO O C.Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentose densidades populacionais performance of maize hybrids submitted to different row spacing and population densities[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2008,43(12):1691-1697. DOI:10.1590/S0100-204X2008001200008.

[5] SALVADOR J P I,GUSTAVO A M,CESAR G L.Genetic control of maize plant architecture traits under contrasting plant densities.[J].*Euphytica:International Journal of Plant Breeding*,2020,216(1):33-43. DOI:10.1007/s10681-019-2552-9.

[6] 贾波，谢庆春，倪向群．玉米籽粒灌浆特性研究进展[J]．江西农业学报，2015,27(12):15-18.DOI:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2015.12.004.
JIA B,XIE Q C,NI X Q.Research progress on grain filling characteristics of maize[J]. *Journal of Jiangxi Agriculture*, 2015,27(12):15-18.DOI:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2015.12.004.

[7] 刘月娥，吕天放，赵久然，王荣焕，徐田军，陈传永，张译天，王元东，刘秀芝．不同玉米杂交品种吐丝持续期特性及其对播期的响应[J].作物学报，2019,45(2):310-315.
LIU Y E,LYU T F,ZHAO J R,WANG R H,XU T J,CHEN Z Y,ZHANG Z T,WANG Y D,LIU X Z.Silk-spinning duration characteristics of different maize hybrids and their response to sowing date[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019,45(2):310-315.

[8] LUCAS E B,JUAN P M,ANIBAL C,ROBERTO H R,FERNANDO H A.Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date[J]. *Field Crops Research*, 2016,198:215-225.DOI:10.1016/j.fcr.2016.09.003.

[9] ZAHRA K.Genetic analysis of yield and qualitative traits in maize (*Zea mays* L.) under heat stress and normal conditions[J]. *The Journal of American Science*, 2011,7(5):449-454.DOI:10.7537/marsjas070511.60.

[10] 付晋峰，王璞.播期和种植密度对玉米籽粒灌浆的影响[J].玉米科学，2016,24(3):117-122,130.
FU J F,WANG P.Effects of sowing date and planting densityon grain filling in maize[J]. *Scientia Maize*, 2016,24(3):117-122,130.

[11] 罗英舰，宋碧，杨锦越，张军，陈杜，叶开梅．贵州春玉米耐密植宜机收品种初步筛选[J]．种子，2019,38(3):24-29.DOI:10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.03.024.
LUO Y J,SONG B,YANG J Y,ZHANG J,CHEN D,YE K M.Preliminary screening of cultivars suitable for high density planting of spring maize in Guizhou[J]. *Seed*, 2019,38(3):24-29.DOI:10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.03.024.

[12] 王萌，陈国强，金海燕，韩晨光，臧凤艳，李子芳，王金龙，吴锡冬．不同种植密度和空间布局方式对夏玉米灌浆速率和籽粒品质的影响[J]．天津农学院学报，2015,22(4):9-12.
WANG M,CHEN G Q,JIN H Y, HAN C G,ZANG F Y, LI Z F,WANG J L,WU X D.Effects of different planting density and spatial arrangement on filling rate and grain qualityof summer maize[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2015,22(4):9-12.

[13] 王铁固，赵新亮，张怀胜，马娟，陈士林．种植密度对玉米叶部性状及灌浆速率的影响[J]．贵州农业科学，2012,40(3):75-78.
WANG T G,ZHAO X L,ZHANG H S,MA J,CHEN S L.Effects of planting density on leaf characters and filling rate of maize[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012,40(3):75-78.

[14] 万泽花，任佰朝，赵斌，刘鹏，董树亭，张吉旺．不同熟期夏玉米品种籽粒灌浆与脱水特性及其密度效应[J]．作物学报，2018,44(10):1517-1526.
WAN Z H,REN B C,ZHAO B,LIU P,DONG S T,ZHANG J W.Grain filling and dehydration characteristics and density effects of summer maize varieties at different ripening tages[J]. *Journal of Crop Science*, 2018,44(10):1517-1526.

[15] 杨贵兰，李新海，李红，李爱军，董红芬，申毅力．耐密玉米杂交种密度效应研究[J]．玉米科学，2009,17(3):107-112.
YANG G L,LI X H,LI H,LI A J,DONG H F, SHEN Y L.Studies on density effects of dense-tolerant maize hybrids[J]. *Scientia Maize*, 2009,17(3):107-112.

[16] 申世界．栽培密度对玉米产量和相关农艺性状的影响[J]．安徽农业科学，2019,47(18):32-34,37.
SHEN S J.Effects of cultivated density on maize yield and related

agronomic traits[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2019,47(18):32-34,37.

[17] 崔丽娜, 李令伟, 崔延臣, 张钰, 禹光媛, 杨连俊, 董树亭. 行距及密度对夏玉米产量及其构成因素的影响[J]. 安徽农业科学, 2019,47(13):29-34.
CUI L N,LI L W,CUI Y C,ZHANG Y,YU G Y, YANG L J,DONG S T.Effects of row spacing and density on yield and its components of summer maize[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2019,47(13):29-34.

[18] 焦浏. 东北地区春玉米密度对冠层结构与功能的影响及其化学调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
JIAO L.Effects of spring maize density on canopy structure and function and its chemical regulation in northeast China[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2014.

[19] ERCOLE O,ALESSANDRO C.Phenotypic and genetic relationships between yield components in maize[J]. *Euphytica*, 1981,30(3):601-609.DOI:10.1007/BF00038787.

[20] 付健, 杨克军, 王玉凤, 张翼飞, 赵莹, 谷英楠, 杨系玲, 刘慧迪, 张发明, 刘承, 刘瑀, 方永江.不同种植方式和密度对玉米子粒灌浆速率的影响[J].湖北农业科学, 2014,53(18):4272-4275. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2014.18.077.
FU J,YANG K J,WANG Y F,ZHANG Y F,ZHAO Y,GU Y N,YANG X L,LIU H D,ZHANG F M,LIU C,LIU Y,FANG Y H.Effects of different planting methods and densitieson grain filling rate of maize[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014,53(18):4272-4275.DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2014.18.077.

[21] BORRÁS L,WESTGATE M E,OTEGUI M E.Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source–sink ratio in maize[J]. *Annals of Botany*, 2003,91(7):857-867.

[22] 申琳. 夏玉米籽粒灌浆与籽粒含水率的关系及籽粒发育过程的分期[J]. 北京农业科学, 1998(5):3-5.
SHEN L.Relationship between grain filling and water content and stages of grain development in summer maize[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 1998(5):3-5.

[23] 杨克军. 栽培方式对玉米产量及品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001.
YANG K J.Effects of cultivation methods on yield and quality of maize[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2001.

[24] 高尚, 明博, 李璐璐, 谢瑞芝, 薛军, 侯鹏, 王克如, 李少昆. 黄淮海夏玉米生理成熟期子粒含水率研究[J]. 作物杂志, 2017(2):88-92.
GAO S,MING B,LI L L,XIE R Z,XUE J,HOU P,WANG K R,LI S K.Studies on grain moisture content of summer maize in physiological maturity stage of Huang-Huai-Hai[J]. *Journal of Crops*,2017(2):88-92.

[25] 卢道文, 张莹莹, 李永江, 宋俊乔, 牛永锋, 孙海潮, 芦连勇, 董文恒, 张晓辉, 崔俊明.8个玉米杂交种籽粒脱水特性研究[J].江苏农业科学, 2019,47(12):122-125.DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.12.026.
LU D W,ZHANG Y Y, LI Y J,QIAO J Q,NIU Y F,SUN H C,LU L Y,DONG W H,ZHANG X H,CUI J M.Study on dehydrating characteristics of 8 maize hybrid seeds[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019,47(12):122-125. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.12.026.

[26] 刘胜群, 郭金瑞, 张卫建, 任军, 宋振伟, 阎孝贡, 宋凤斌, 朱先灿. 种植密度对春玉米茎秆和根系水分状况的影响[J]. 土壤与作物, 2014,3(3):93-98.
LIU S Q,GUO J R,ZHANG W J,REN J,SONG Z W,YANX G,SONG F B,ZHU X C.Effects of planting density on stemand root moisture status of spring maize[J]. *Soil and Crops*, 2014,3(3):93-98.

[27] 高尚, 明博, 李璐璐, 谢瑞芝, 薛军, 侯鹏, 王克如, 李少昆. 黄淮海夏玉米籽粒脱水与气象因子的关系[J]. 作物学报, 2018,44(12):1755-1763.
GAO S,MING B,LI L L,XIE R Z,XUE J,HOU P,WANG K R,LI S K.Relationship between grain dehydration and meteo rological factors in Huang-Huai-Hai summer maize[J]. *Journal of Crops*, 2018,44(12):1755-1763.

（责任编辑　白雪娜）