



增温对玉米茎秆生长发育、抗倒性和产量的影响

刘东尧, 闫振华, 陈艺博, 杨琴, 贾绪存, 李鸿萍, 董鹏飞, 王群[✉]

(河南农业大学农学院/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 郑州 450002)

摘要:【目的】随着全球气候变化, 温度升高对玉米生产系统的影响越来越复杂, 而玉米抗倒性在现在和未来玉米全程机械化生产系统中的重要性尤为突出。研究全生育期温度增加对玉米茎秆生长发育及抗倒的力学特性的影响, 为应对未来气候变化下玉米适应性栽培途径提供理论和实践基础。【方法】以郑单 958 (ZD958) 和先玉 335 (XY335) 为材料, 通过智能温室控制方法, 设置 3 个温度梯度, 分别为 CK、CK+2℃、CK+4℃, 研究了全生育期增温对玉米茎秆生长、结构发育、抗倒力学特性和产量的影响。【结果】随着温度增加, 玉米株高、穗位高、第三节间长度、穗上节间长和穗下节间长均显著高于对照, CK+2℃处理的株高、穗位高、第三节间长度、穗上节间长度和穗下节间长度比 CK 平均增加 10.80%、37.29%、16.87%、17.11%和 17.78%, CK+4℃处理则比 CK 分别增加 20.82%、54.17%、37.11%、28.48%和 35.84%。温度增加显著增加了玉米穗位系数和茎粗系数, CK+4℃处理比 CK+2℃处理和 CK 的茎粗系数平均增加 15.92%和 58.99%。增温使玉米茎秆维管束数目和面积显著减少, CK+4℃、CK+2℃处理的第三节间的茎秆中央维管束数目比 CK 平均减少 42.39%、22.59%, 维管束总面积比 CK 分别降低 40.33%、28.68%, 增温对中央维管束数目和面积的影响大于边缘维管束。随温度增加, 玉米茎秆抗推力、穿刺强度和破碎强度显著降低, CK+4℃和 CK+2℃处理比 CK 平均降低 50.75%和 43.75% (茎秆抗推力)、25.41%和 29.59% (穿刺强度)、22.41%和 23.58% (破碎强度)。茎秆抗推力与株高、穗位高和地上部第三节间长呈极显著负相关, 与茎粗、截面惯性矩、边缘维管束数目、面积、中心维管束数目、面积呈极显著正相关。2 个品种对全生育期增温响应不同。随温度增加, 热敏感型品种 XY335 的株高、穗位高、第三节间长度、穗位系数和茎粗系数增幅显著大于 ZD958; ZD958 的边缘和中心单个维管束面积减少, 而 XY335 维管束面积呈增加趋势, 且 ZD958 维管束数目和边缘维管束总面积的降幅小于 XY335; XY335 茎秆抗推力降幅显著大于 ZD958, 且 XY335 穿刺强度和破碎强度最大值出现在吐丝后 25 d, 之后下降, 而 ZD958 在成熟期。ZD958 穿刺强度和破碎强度与株高、穗位高、地上部第三节间长均呈显著负相关, 与茎粗显著正相关, XY335 穿刺强度与株高呈显著负相关, 破碎强度则与其他指标相关但不显著。【结论】温度增加促进了玉米茎秆生长发育, 改变了茎秆内部结构, 使茎秆抗推力下降, 倒伏风险显著增大, 且温度越高倒伏风险越大; 不同品种茎秆生长特性和倒伏能力对增温响应存在明显差异。

关键词: 增温; 玉米; 节间长度; 茎秆维管束; 茎秆力学特性; 抗倒性

Effects of Elevated Temperature on Maize Stem Growth, Lodging Resistance Characters and Yield

LIU DongYao, YAN ZhenHua, CHEN YiBo, YANG Qin, JIA XuCun, LI HongPing, DONG PengFei, WANG Qun[✉]

College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450002

Abstract: 【Objective】With the global climate change, the effects of elevated temperature on maize production system are

收稿日期: 2020-09-13; 接受日期: 2020-11-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0300300)、国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-02-17)

联系方式: 刘东尧, E-mail: nxy1302@163.com. 通信作者王群, E-mail: wangqun177@163.com

increasingly complex. Lodging resistance plays an important role on the completely mechanized maize production system in present and the future. Thus, the studying on the characteristics of maize stem and lodging resistance responding to gradient warming during the whole season could provide the theoretical and practical basis to the adaptive cultivation approach in response to climate change in the future. **【Method】** Zhengdan 958 (ZD958) and Xianyu 335 (XY335) were tested as materials. Three temperature gradient of CK, CK+2℃, CK+4℃ were conducted in the greenhouse to study the effects of gradient warming on stem growth and development, stem mechanics characters, lodging resistance characters and grain yield. **【Result】** The results showed that with increasing temperature, plant height, ear height, the third internode length, stem length under the ear and above the ear were significantly higher than that of CK; CK+2℃ increased on average by 10.80%, 37.29%, 16.87%, 17.11% and 17.78%, respectively, compared to CK; CK+4℃ increased on average by 20.82%, 54.17%, 37.11%, 28.48% and 35.84%, respectively, compared to CK. Temperature increment significantly increased the ear location coefficient and stem diameter coefficient. Compared with CK+2℃ and CK, the stem diameter coefficient of CK+4℃ was increased by 15.92% and 58.99% on average, respectively. Temperature increment significantly decreased the number and area of vascular bundles of stems. Compared with CK, CK+4℃ and CK+2℃ decreased the number of central vascular bundles of third internode by 43.29% and 22.59%, respectively; CK+4℃ and CK+2℃ decreased total vascular bundle area by 40.33% and 28.68%, respectively. The effect of temperature increment on the number and area of central vascular bundle was greater than that of peripheral vascular bundle. The elevated temperature decreased the area of single peripheral and central vascular bundle, but increased that of XY335. And ZD958 had greater increment of the number of vascular bundles and area of total area of peripheral vascular bundles than XY335 under elevated temperature. Temperature increment significantly decreased the thrust resistance, puncture strength and crushing strength; Compared with CK, CK+4℃ and CK+2℃ significantly increased the thrust resistance by 50.75% and 43.75%, puncture strength by 25.41% and 29.59%, crushing strength by 22.41% and 23.58%, respectively. The thrust resistance showed significantly negative relationship with plant height, ear height and the third internode length, and positive relationship with stem diameter, moment of inertia, the number and area of peripheral vascular bundle, the number and area of central vascular bundle. XY335 and ZD958 had different responses to temperature increment in the whole season. Under elevated temperature, XY335 had higher increment of plant height, ear height, the third internode length, ear position coefficient and the stem diameter coefficient than ZD958. As the temperature rose, the area of single peripheral and central vascular bundle of ZD958 decreased, while the area of vascular bundle of XY335 increased. The decrease of the number of vascular bundle and the total area of edge vascular bundle of ZD958 was less than that of XY335. As the temperature rose, stem thrust reduction of XY335 was significantly greater than that of ZD958. XY335 showed maximum values at 25 days after silking, declined later, while ZD958 showed maximum values at the mature stage. The puncture strength and crushing strength of ZD958 were significantly negatively related to plant height, ear height and the third internode length, while positively related to stem diameter. The puncture strength of XY335 was significantly negatively related to plant height, while the crushing strength showed no significant relationship with those indexes. **【Conclusion】** Elevated temperature significantly promoted the growth and development of corn, and changed microstructure of stem, decreased the stem thrust resistance and increased lodging risk. The higher the temperature was, the greater the risk of lodging. The stem growth traits and lodging ability in different cultivars had significantly different response to elevated temperature.

Key words: elevated temperature; maize; internode length; stem vascular bundles; mechanics characteristic of stem; lodging resistance

0 引言

【研究意义】玉米是重要的粮食、饲料、工业原料作物,在我国是第一大粮食作物,在保障国家粮食安全和国民经济发展中占有重要地位^[1]。随着全球气候变暖,1906—2005 年全球地表平均气温升高了 0.74℃,且近 50 年的线性增温速率达 0.13℃·(10a)⁻¹。温度升高不仅成为全球气候变化的必然趋势,而且对作物生产系统,如茎叶生长、雌雄发育、产量形成等产生了诸多影响^[2-3],尤其是对玉米茎秆生长特性及

抗倒性的影响,直接影响着玉米机械收获和玉米全程机械化进程的推进^[4-6]。在我国每年因玉米倒伏、倒折造成的产量损失平均为 5%—25%,个别年份甚至更高^[5-7]。**【前人研究进展】**大量研究表明,高温条件下幼苗高度显著高于常温对照,但主根长度、根冠比和单株质量均逐渐降低。温度升高促进了籽粒萌发,显著提高玉米种苗转化过程中淀粉酶的活性,促进幼苗的生长^[8-9],而灌浆前期高温显著加快了玉米强、弱勢籽粒的前期灌浆速率,降低了籽粒淀粉合成相关酶活性,从而降低淀粉含量。但当花期高温形成

胁迫时, 玉米行粒数、穗粒数、干物质重及产量显著降低^[10-11]。温度升高不仅影响玉米苗期和籽粒灌浆, 也影响茎秆生长发育。研究表明, 玉米播种后 30 d 内, 随着积温、日均温和日最低温的增加, 株高显著增加, 且积温、日均温与株高显著正相关^[12]; PICKETT 等^[13]研究发现, 玉米抗倒性与株高、穗位高、基部节间长度呈负相关, 与茎粗、节间粗度、茎壁厚度及茎秆的截面惯性矩高度正相关, 截面惯性矩越小, 茎秆抗倒伏能力越差^[14]; 随着茎秆维管束密度增加和维管束面积的减小, 茎秆抗推力降低, 倒伏率增加, 抗倒性下降, 同时茎秆倒伏率与中央大维管束平均面积呈负相关关系^[15], 且大维管束面积对玉米倒伏影响远大于小维管束面积^[16], 而茎秆中的小维管束的数目对茎秆稳定性也起主要作用^[17], 因此茎秆结构和力学特性指标常常作为判断茎秆抗倒性的重要指标^[14,18-19]。茎秆抗倒性不仅与茎秆结构和自身力学特性有关, 亦受外界因素(风力、降雨)和管理措施影响^[20-22], 风力增大, 倒伏率增加; 长期降雨或淹水, 使玉米茎基部变细, 穿刺强度降低, 倒伏率升高, 抗倒性下降; 寡照使玉米茎基变细、节间缩短、直径变小, 茎秆穿刺强度降低, 倒伏率增加^[23-24]; 种植密度过大亦导致茎秆变细, 质量变差, 倒伏率大大增加^[25]; 玉米割苗可显著降低玉米株高, 缩短基部第三节间长度, 增加茎粗, 增强抗倒性, 且随着割苗时间延后, 节间缩短和基部加粗的幅度变大, 但同时减产幅度也越大^[26-27]。随着全球气候变暖, 专家预测 21 世纪末地表温度将增加 1—3.5℃^[28-29], 增温也必将对植物组织结构及其生产系统产生明显影响^[30-31]。2015 年《巴黎协定》和 2018 年 IPCC 会议上, 专家提出植物生态系统气温升高的临界点是增加 2℃, 当气温增加超过 2℃, 将对全球多个方面尤其是植物生态和农业生产系统产生严重、甚至是毁灭性影响, 因此专家提出到 21 世纪末全球平均气温增加幅度将控制在 2℃以内^[32-33]。【本研究切入点】全球温度升高已成为未来气候变化的主要趋势之一, 前人虽做过大量关于高温及高温胁迫对玉米生长发育、器官建成、生理特性以及籽粒建成和灌浆的影响, 但大多数高温限于阶段性高温, 如苗期或花期高温, 而全生育期的增温关注较少, 尤其关于全生育期温度增加对玉米茎秆生长发育、茎秆结构及抗倒性的影响研究更少。【拟解决的关键问题】本试验通过模拟未来气候增温, 研究了玉米全生育期增温条件下玉米茎秆生长、结构特征和抗倒特性变化, 以期对未来温度变化下增强玉米

抗倒性、适应玉米机械化收获和适应性栽培途径提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018—2019 年在河南省驻马店市西平县二郎乡河南农业大学西平试验基地(33°19'48"N, 114°01'01"E)进行, 该区地处黄淮海平原南部, 年平均气温 15.8℃, 年平均降雨量 910 mm, 无霜期 221 d, 以小麦玉米一年两熟为主。本试验设置 3 个处理, 分别为 CK(对照), CK+2℃(全生育期温度比对照增加 2℃), CK+4℃(全生育期温度比对照增加 4℃); 采用人工半控制气候室, 自动控制系统进行温度精确控制。试验材料为对温度反应不同的 2 个品种, 分别为郑单 958(ZD958, 热钝感型)和先玉 335(XY335, 热敏感型), 种植密度 63 000 株/hm², 小区面积 45 m², 3 次重复。供试土壤为砂姜黑土, 土壤物理机械组成为物理性砂粒 18.6%、物理性粉粒 42.2%、物理性黏粒 39.2%, 0—20 cm 土层土壤养分为有机质含量 12.39 g·kg⁻¹、全氮含量 1.18 g·kg⁻¹、碱解氮含量 120.5 mg·kg⁻¹、速效磷含量 20.12 mg·kg⁻¹、速效钾含量 94.66 mg·kg⁻¹。2 年均于 5 月 25 日播种, 并于播种前 5 d 按照试验设计设置的温度进行温室温度设定和调试, 其他参数指标与对照一致, 肥水管理和病虫害管理同当地一般大田生产。试验期间利用人工半控制智能温室自动记录处理期间平均温度、空气湿度和光照强度变化, 各处理试验期间的气象因子如图 1 所示。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 茎秆农艺性状 于吐丝期(R)选取各处理具有代表性的 10 株, 用米尺测株高、穗位高、基部第三节节间长度、穗上节间长度、穗下节间长度, 利用电子游标卡尺测量茎粗, 其中株高为地面到雄穗顶端的距离, 穗位高为地面到雌穗着生节的距离, 穗上节间长度为穗位节到顶部节的各节长度总和, 穗下节间长度为基部第一节到穗位节的各节长度总和, 茎秆第三节节间短轴的径向直径为茎粗(d); 并根据测定指标值计算茎秆的截面惯性矩、穗位系数和茎粗系数, 其中截面惯性矩(I)= $\pi d^4/64$, $\pi \approx 3.14$, 穗位系数=穗位高/株高, 茎粗系数=节间长度/茎粗。

1.2.2 茎秆力学指标 分别于玉米抽雄期(VT)、吐丝后 10 d(AS10)、吐丝后 25 d(AS25)、成熟期(TR)、成熟后 10 d(TR10)选取各处理代表性植株 9 株, 每 3 株为一个重复, 使用 YYD-1 型茎秆强

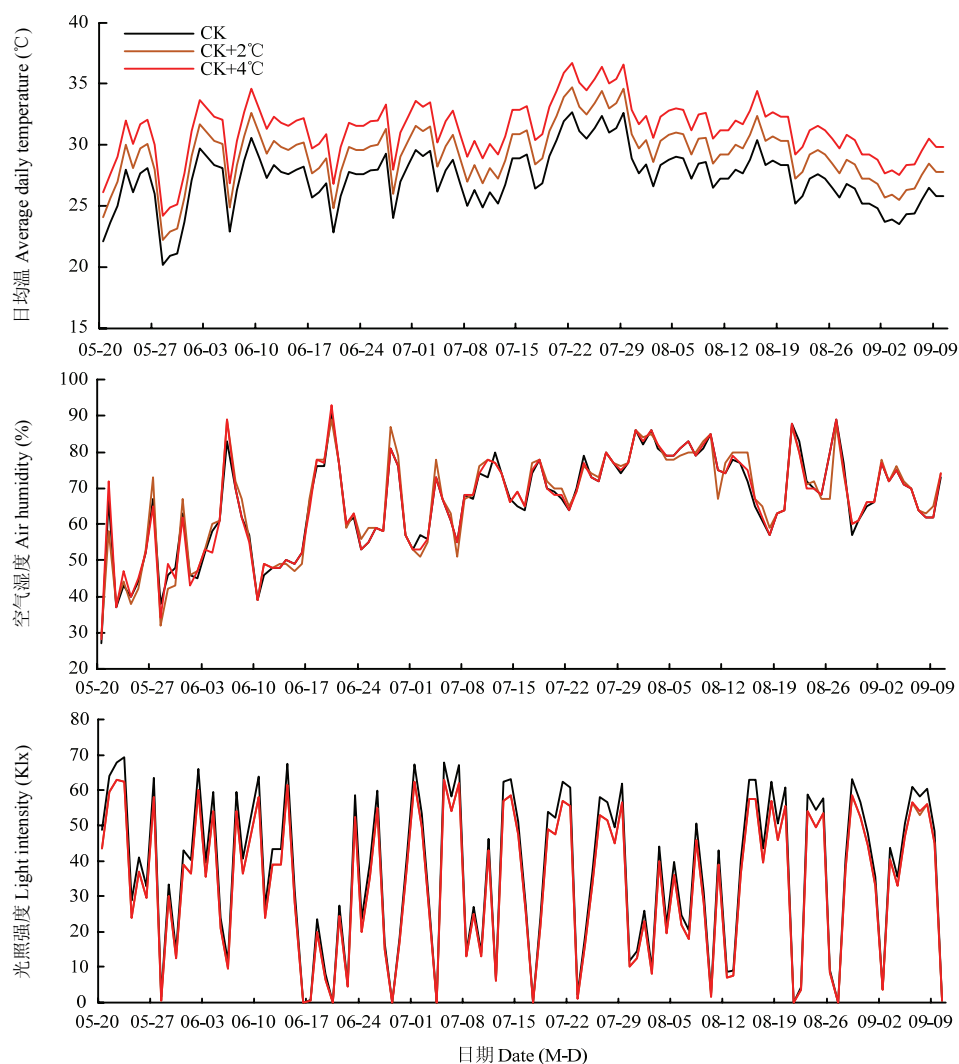


图 1 不同处理下日均温、空气湿度和光照强度的变化

Fig. 1 The changes of the average daily temperature, air humidity and light intensity under different treatments

度测定仪测定茎秆地上部第三节间抗推力、穿刺强度和破碎强度。测定抗推力时将测定仪始终垂直作用于玉米茎秆地上部第三节短轴一侧正中部位置，当主茎与地面呈 45° 夹角时，记录数值 (N)；测定穿刺强度时使用横截面积为 1 mm^2 的测头，匀速插入第三节间中部，记录穿透表皮时的最大值 ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$) 即为穿刺强度；测定破碎强度时使用直径为 1 cm 的圆柱形测头，所压部位为第三节间中部，记录茎皮撕裂的最大值 ($\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$) 即为破碎强度。

1.2.3 茎秆显微结构 于抽雄期 (VT) 选取各处理代表性植株 5 株，取茎秆地上第三节间的中间部位 2.0 cm 长的茎段，保存于 70% 乙醇溶液中，采用徒手切片法切其横截面，并在 OLYMPUS BX43 显微镜下

进行观察拍照，采用 Cell Sens Standard 软件统计分析显微视野中切片横截面的大维管束数目、小维管束数目和单个大小维管束的面积，其中单个维管束面积取其平均值，维管束总面积是显微镜视野中显现的所有维管束的面积总和。

1.2.4 考种与计产 选取各处理的双行连续果穗共 20 个，自然晾干，考察和测定穗部性状 (穗长、穗粗、穗粒数、百粒重、穗行数、行粒数和穗秃尖长)，并折合 14% 的籽粒水分进行计产。

1.3 数据分析

将 2 年数据平均值用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据整理和作图，用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和多重比较。

2 结果

2.1 增温对玉米茎秆农艺性状的影响

随着温度增高，玉米株高、穗位高、第三节间长度、穗上节间长度、穗下节间长度、穗位系数均显著增加（表 1），处理间增加幅度表现为 CK+4℃>CK+2℃>CK，其中 CK+4℃处理的株高、穗位高、第三节间长度、穗上、穗下节间长度和穗位系数比 CK 平均增加 20.82%、54.17%、37.11%、28.48%、35.84%和 27.15%，差异均达显著水平，CK+2℃处理则比 CK 平均增加 10.80%、37.29%、16.87%、17.11%、17.78%和 22.61%，差异达显著水平，CK+4℃比 CK+2℃分别增加 8.98%、11.02%、18.28%、9.77%、15.37%和 3.85%，除株高其他指标差异显著。温度增高使玉米茎粗变细，截面惯性矩变小，茎粗系数增大，其中 CK+4℃和 CK+2℃处理茎粗比 CK 平均降低 13.65%和 14.93%，截面惯性矩比 CK 平均降低 43.89%和 44.91%，茎粗系数则比 CK 增加 58.99%和 34.75%，各处理与对照

差异显著。2 个品种对增温响应表现为品种 XY335 的株高、穗位高和穗下节间长度随着温度升高其增幅均显著大于 ZD958，如 CK+4℃处理的 XY335 株高、穗位高比 CK 增加 27.07%、59.63%，CK+2℃处理株高、穗位高比 CK 增加 13.82%、35.45%，ZD958 则分别比 CK 增加 14.58%、48.70%（CK+4℃处理）和 7.78%、39.12%（CK+2℃处理），且株高、穗位高和节间长度在 XY335 增温处理与对照间两两差异显著，而 ZD958 株高和穗位高在 CK+4℃和 CK+2℃处理间差异不显著。增温处理下 ZD958 穗上节间长度的增幅大于 XY335，ZD958 在增温 4℃和 2℃下，穗上部节间长比 CK 增加 34.14%和 23.48%，而 XY335 则分别比 CK 增加 22.81%和 10.73%。ZD958 的茎粗系数低于 XY335，随着温度升高，ZD958 茎粗系数增幅小于 XY335，其中 CK+4℃和 CK+2℃处理中 ZD958 的茎粗系数比 CK 分别增加 55.59%和 39.51%，而 XY335 则分别增加 62.39%和 34.98%，表现出热敏型品种 XY335 茎秆的生长发育尤其穗下节间长对温度升高的响应更为敏感。

表 1 不同处理下株高、穗位高、节间长度和茎粗的变化

Table 1 The change of plant height, ear height, stem length and stalk width under different treatments

品种	处理	株高	穗位高	穗位系数	穗下节间长	穗上节间长	第三节间长	茎粗	茎粗系数	截面惯性矩
Cultivar	Treatment	Plant height	Ear height	Ear	Stem length	Stem length	3rd internode	Stalk width	Stalk width	Moment of
		(cm)	(cm)	coefficient	under ear (cm)	above ear (cm)	length (mm)	(mm)	coefficient	inertia(mm ⁴)
ZD958	CK	274.33a	100.20a	0.37a	94.12a	107.52a	115.33a	20.16a	5.72a	8111.66a
	CK+2℃	295.67b	139.40b	0.47b	111.67b	132.77b	149.33b	18.72b	7.98b	6040.42b
	CK+4℃	314.33b	149.00b	0.47b	123.20c	144.23c	163.33c	18.35b	8.90c	5575.95b
XY335	CK	294.33a	97.60a	0.33a	93.60a	149.60a	164.67a	23.99a	6.86a	16265.35a
	CK+2℃	335.00b	132.20b	0.39b	109.43b	165.65b	171.67b	18.54b	9.26b	5809.57b
	CK+4℃	374.00c	155.80c	0.42b	131.77c	183.72c	218.33c	19.60b	11.14c	7234.58b

同一列中不同的小写字母表示 5%水平下差异显著。下同

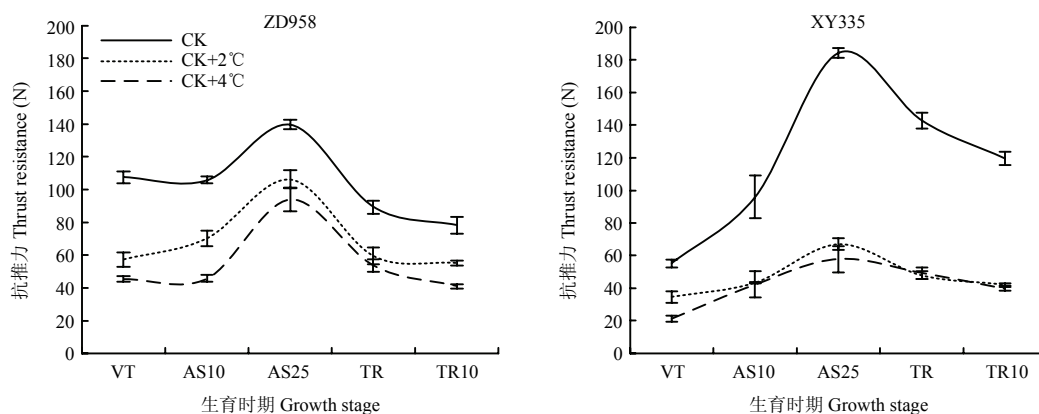
The different letters are significantly different at 0.05 probability level. The same as below

2.2 增温对玉米茎秆力学特性的影响

2.2.1 对地上部第三节间抗推力的影响 由图 2 可知，随着玉米生育进程推进，2 个品种地上部第三节间茎秆抗推力呈单峰曲线变化，在吐丝后 25 d 达到最大值，平均最大抗推力为 161.89 N，随后茎秆抗推力下降。温度增加显著降低了第三节间茎秆抗推力，其中 CK+4℃处理的抗推力比 CK+2℃处理和 CK 平均降幅为 11.80%—13.88%和 32.83%—68.67%，CK+2℃处理比 CK 平均降幅为 23.87%—63.63%。2 个品种间比较，随着温度升高，XY335 茎秆抗推力的下降幅度显

著大于 ZD958，在成熟后 10 d 品种 ZD958 CK+4℃和 CK+2℃处理的抗推力比 CK 分别降低 47.64%和 29.35%，而同时期 XY335 的 CK+4℃和 CK+2℃处理比 CK 分别降低 66.92%和 64.59%，表现为热敏感型品种 XY335 的抗推力的变化比钝感型品种 ZD958 对增温更为敏感。

2.2.2 对地上部第三节间穿刺强度的影响 由图 3 可知，不同温度处理下玉米茎秆穿刺强度随生育进程呈现先增加后下降的曲线变化趋势，穿刺强度的最大值出现在成熟期前后；随温度增加，茎秆穿刺强度降



CK: 对照, CK+2°C: 全生育期比对照增加 2°C, CK+4°C: 全生育期比对照增加 4°C, VT: 抽雄期, AS10: 吐丝后 10 d, AS25: 吐丝后 25 d, TR: 成熟期, TR10: 成熟后 10 d。下同

CK: Contrast, CK+2°C: 2°C higher than the control in the whole growth season, CK+4°C: 4°C higher than the control in the whole growth season, VT: Tassel, AS10: 10 days after silking, AS25: 25 days after silking, TR: Mature period, TR10: 10 days after maturity. The same as below

图 2 不同处理下茎秆抗推力动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of stalk thrust resistance under different treatments

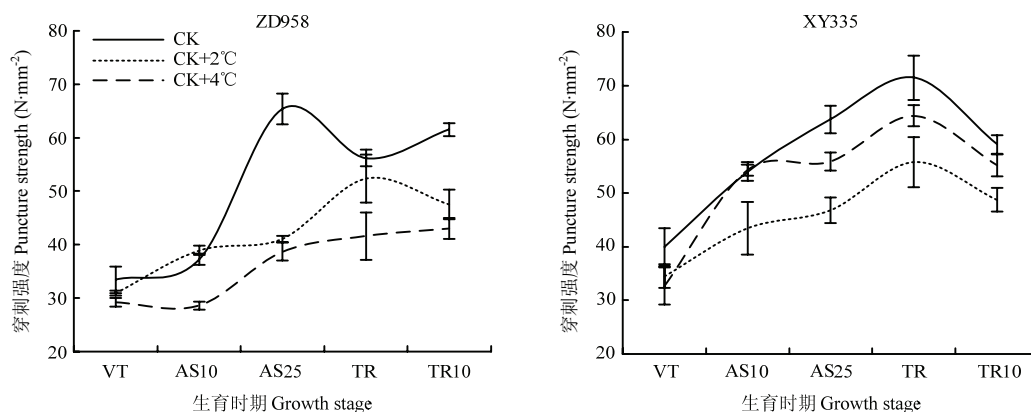


图 3 不同处理下茎秆穿刺强度动态变化

Fig. 3 The dynamic changes of stalk puncture strength under different treatments

低, CK+4°C和 CK+2°C处理的茎秆穿刺强度比 CK 分别降低 9.98%—40.83%和 22.03%—37.15%。2 个品种比较, 随着温度升高及生育进程推进, 茎秆穿刺强度的峰值日期和变化趋势不同, CK+2°C和 CK+4°C处理下 ZD958 茎秆穿刺强度在成熟期达到最大值, CK 则在吐丝后 25 d 达到最大值, 随后下降并在成熟后 10 d 趋于上升, ZD958 处理间穿刺强度大小表现为 CK>CK+2°C>CK+4°C; 而 XY335 各处理穿刺强度均在成熟期达到最大值, 之后降低, 但处理间穿刺强度大小表现为 CK>CK+4°C>CK+2°C, 这可能与 CK+4°C处理后期籽粒较少、产量较低, 茎秆积累物质无法转运有直接关系。

2.2.3 对地上部第三节间破碎强度的影响 随着生育进程, 不同温度处理下茎秆破碎强度与抗推力变化趋势一致, 呈先增后降的变化趋势, 茎秆破碎强度的最大峰值出现在吐丝后 25 d 至成熟期(图 4)。不同处理比较, 成熟期前 2 个品种茎秆破碎强度随着温度升高显著下降, 如吐丝后 25 d, CK+4°C和 CK+2°C处理的茎秆破碎强度比 CK 分别降低 13.57%—31.42%和 9.54%—37.61%, 但在成熟期至成熟后 10 d, 茎秆破碎强度随温度增加而升高, 在成熟后 10 d 时, CK+4°C处理的破碎强度比 CK+2°C处理增加 9.97%—20.74%, 比 CK 增加 30.65%—41.33%, CK+2°C处理的破碎强度比 CK 增加 6.58%—18.80%,

增温处理与对照差异显著。不同品种比较, 茎秆破碎强度最大值出现时期和随着温度变化的趋势不同, 增温处理下 ZD958 茎秆破碎强度在成熟期出现最大值, CK 则出现在吐丝后 25 d, 且成熟期至成熟 10 d, 增温处理的破碎强度明显大于对照; XY335 的增温处理和对照的茎秆破碎强度最大值均出现在吐丝后 25 d, 随后下降, 该变化趋势可能与各处理茎秆干物质的累积和运输不畅有关。

2.3 增温对玉米茎秆显微结构的影响

随着温度增加, 地上部第三节间茎秆的中心和边缘维管束数量显著减少, 中心维管束和边缘维管束排列疏松, 且靠近皮层的边缘小维管束分布的层数明显减少, 平均减少 1—2 层。由于维管束数目的减少, 导致维管束总面积亦减少 (图 5)。由表 2 数据统计

可以看出, CK+4℃ 和 CK+2℃ 处理的边缘维管束数目比 CK 平均减少 33.41% 和 25.70%, 中心维管束数目比 CK 平均减少 51.37% 和 19.48%; 边缘维管束总面积分别比 CK 降低 38.66% 和 23.46%, 中心维管束总面积比 CK 分别降低 42.66% 和 25.91%, CK+4℃、CK+2℃ 处理和 CK 间两两差异显著。2 个品种间比较, 随温度升高, XY335 的边缘和中心维管束数目以及边缘维管束总面积降低幅度大于 ZD958, 在 CK+4℃ 和 CK+2℃ 处理下, XY335 边缘维管束数目比 CK 平均降低 38.96% 和 29.87%, ZD958 则比 CK 平均降低 27.85% 和 21.53%, XY335 中心维管束数目比 CK 平均降低 61.36% 和 29.10%, ZD958 则比 CK 平均降低 41.38% 和 12.05%; 但 ZD958 的中心维管束总面积下降幅度大于 XY335。2 个品种单个维管束面积

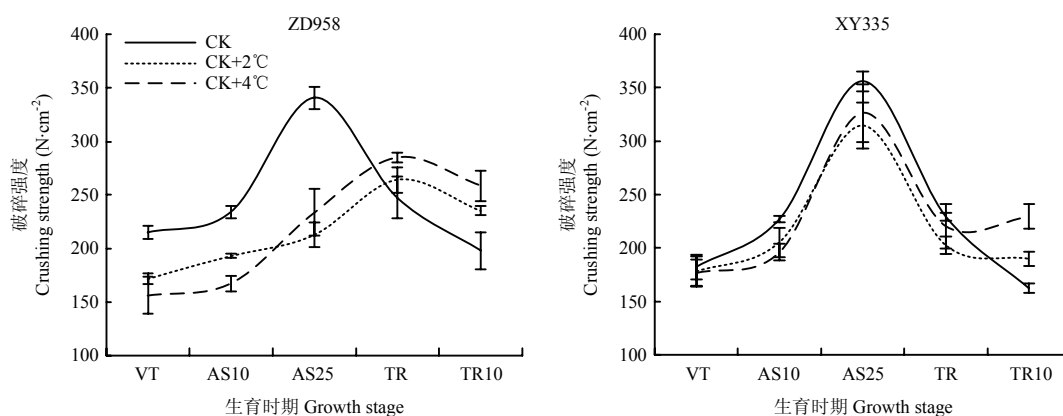


图 4 不同处理下茎秆破碎强度动态变化

Fig. 4 The dynamic changes of stalk crushing strength under different treatments

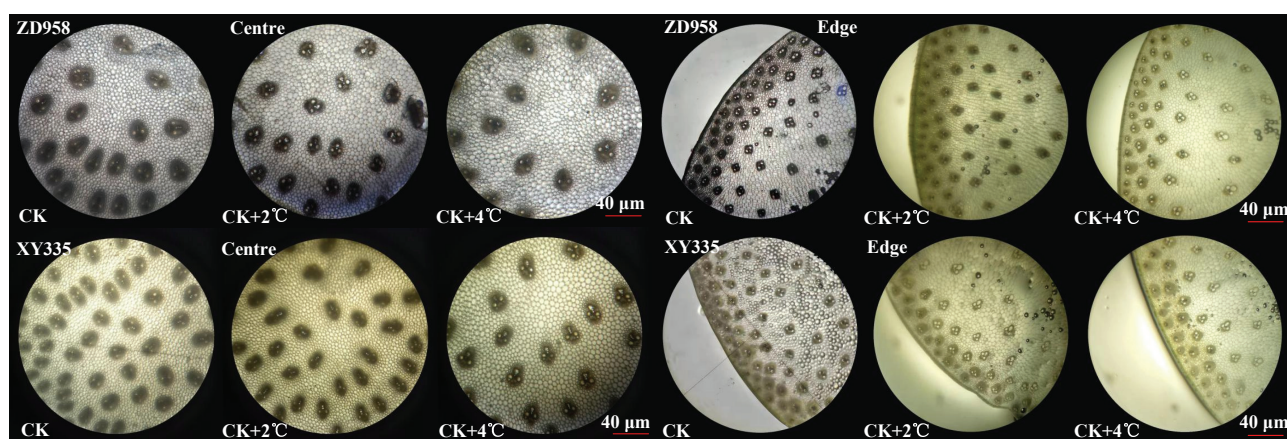


图 5 不同处理下玉米茎秆第三节节间的显微结构

Fig. 5 The micro structure of the third internode of above ground under different treatments

表 2 不同处理下茎秆维管束数目与面积变化
Table 2 The number and area of vascular bundle of stem under different treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	维管束数目		单个维管束面积		维管束总面积	
		Number of vascular bundle		Single vascular bundle area		Vascular bundle total area	
		边缘 Edge (Number per field)	中心 Centre (Number per field)	边缘 Edge ($\times 10^3 \mu\text{m}^2$)	中心 Centre ($\times 10^3 \mu\text{m}^2$)	边缘 Edge ($\times 10^5 \mu\text{m}^2$)	中心 Centre ($\times 10^5 \mu\text{m}^2$)
ZD958	CK	52.67a	19.33a	5.65a	34.12a	3.96a	6.47a
	CK+2℃	41.33b	17.00a	5.50a	25.51b	3.30b	4.33b
	CK+4℃	38.00b	11.33b	2.94b	29.01b	2.56c	3.19c
XY335	CK	51.33a	39.67a	3.29a	15.30a	3.67a	5.98a
	CK+2℃	36.00b	29.00b	4.95b	16.81a	2.56b	4.86b
	CK+4℃	31.33b	15.33c	5.65c	26.10b	2.13c	3.91c

随温度升高，变化趋势相反，ZD958 随温度升高单个维管束面积呈下降趋势，XY335 则随温度升高呈上升趋势。ZD958 中心单个维管束面积，在 CK+4℃和 CK+2℃处理下比 CK 平均降低 19.55%和 25.22%，XY335 则比 CK 增加 70.59%和 9.80%；ZD958 边缘单个维管束面积在 CK+2℃与 CK 处理间变化较小，但 CK+4℃比 CK 减少 47.92%，XY335 边缘单个维管束面积则表现为 CK+4℃和 CK+2℃处理比 CK 增加 71.43%和 50.46%，CK+4℃处理比 CK+2℃处理增加 14.14%，且两两间差异显著。

2.4 茎秆力学特性与农艺性状、茎秆显微结构的相关性

分析力学特性与株高、茎粗、节间长度及显微结构的相关关系可知（表 3），茎秆的抗推力与株高、穗位高、地上部第三节间长度呈极显著负相关，与茎粗、截面惯性矩、边缘维管束数目及面积、中心维管束数目及面积呈极显著正相关。茎秆穿刺强度与株高、穗位高、地上部第三节间长呈负相关，与茎粗、边缘维管束数目及面积、中心维管束数目及面积呈显著正相关，与截面惯性矩呈正相关，但不显著。茎秆破碎

表 3 不同处理下茎秆力学特性与农艺性状、维管束结构的相关性
Table 3 Correlation between mechanical characteristics and agronomic trait and vascular bundle in maize stalk under different treatments

品种 Cultivar	力学特性 Mechanical characteristics	株高 Plant height	穗位高 Ear height	茎粗 Stalk width	截面惯性矩 Moment of inertia	地上部第三节间长 3rd joint length	边缘维管束数目 Marginal vascular bundle number	边缘维管束面积 Marginal vascular bundle area	中心维管束数目 Central vascular bundle number	中心维管束面积 Central vascular bundle area
ZD958	抗推力 Thrust resistance	-0.860**	-0.966**	0.987**	0.890**	-0.972**	0.983**	0.913**	0.798**	0.970**
	穿刺强度 Puncture strength	-0.478	-0.623	0.706*	0.648	-0.706*	0.61	0.618	0.578	0.622
	破碎强度 Crushing strength	-0.826**	-0.825**	0.775*	0.929*	-0.890**	0.844**	0.806**	0.720*	0.841**
XY335	抗推力 Thrust resistance	-0.939**	-0.945**	0.938**	0.845**	-0.939**	0.954**	0.959**	0.943**	0.963**
	穿刺强度 Puncture strength	-0.670*	-0.534	0.626	0.532	-0.626	0.571	0.571	0.532	0.556
	破碎强度 Crushing strength	-0.063	-0.227	0.131	0.200	-0.195	0.252	0.251	0.233	0.244

*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。**表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。下同
* indicates significant correlation at $P<0.05$.** indicates significant correlation at $P<0.01$. The same as below

强度与株高，穗位高，地上部第三节间长呈极显著负相关，与茎粗、边缘维管束数目及面积、中心维管束数目和面积呈正相关关系。不同品种其力学特性与农艺性状、显微结构参数的相关程度不同，增温处理下 ZD958 的茎秆穿刺强度与茎粗显著正相关，与第三节间长度呈显著负相关，而 XY335 的茎秆穿刺强度与株高显著负相关，与茎粗正相关，与第三节间长度呈负相关，但均不显著；同样 ZD958 的茎秆破碎强度与茎粗、截面惯性矩、边缘维管束数目及面积、中心维管束数目及面积呈显著或极显著正相关，与地上部第三节间长呈极显著负相关；而 XY335 的茎秆破碎强度与这些指标虽然相关，但不显著，这可能与逆境胁迫下 XY335 茎秆中的贮存物质在后期

难以转运有关。

2.5 增温对玉米产量、产量构成因素的影响及其相关性分析

2 年产量和产量构成因素的结果表明，年际之间产量变化不显著，品种及处理间差异达显著水平（表 4）。以 2 年均值分析可知，随温度增加，玉米穗长、穗粗显著降低，秃尖长显著增加，CK+4℃和 CK+2℃处理的穗长平均比 CK 减少 15.21%和 11.35%，穗粗比 CK 减少 18.82%和 31.43%，秃尖长平均比 CK 增加 36.89%和 421.60%。随着温度增加，玉米产量、穗粒数和行粒数显著下降，其中 CK+4℃和 CK+2℃处理的产量比 CK 平均降低 54.67%和 40.49%，穗粒数平均比 CK 减少 77.13%和 42.86%，行粒数平均比 CK 减少 56.03%

表 4 不同处理下产量及产量构成因素
Table 4 Yield and yield components under different treatments

年际	品种	处理	产量	穗粒数	百粒重	穗行数	行粒数	穗长	穗粗	穗秃尖
Year	Cultivar	Treatment	Yield (kg·hm ⁻²)	Ear grain	100-grain weight (g)	rows per ear	Grain number per row	Ear length (cm)	Ear diameter (mm)	Ear bald tip (cm)
2018	ZD958	CK	9156.04a	655.60a	22.20a	15.20a	43.20a	22.40a	51.97a	1.76a
		CK+2℃	5974.92b	429.20b	22.19a	16.00a	27.00b	19.70b	42.45b	2.40a
		CK+4℃	4354.94c	298.00c	23.34a	15.60a	19.00c	19.76b	44.54b	2.33a
	XY335	CK	9939.13a	672.00a	23.47a	15.60a	43.20a	22.26a	48.85a	1.96a
		CK+2℃	5561.39b	365.60b	24.28a	15.60a	23.40b	19.23b	40.63b	2.79a
		CK+4℃	140.74c	8.20c	29.24b	1.80b	4.20c	20.10b	23.98c	18.10b
2019	ZD958	CK	9296.15a	644.40a	22.90b	15.60a	41.40a	22.56a	52.48a	3.14a
		CK+2℃	5991.43b	361.60b	25.69a	14.40a	25.20b	18.50b	41.18b	3.40a
		CK+4℃	3901.46c	291.20c	21.24b	16.00a	18.20c	18.86b	45.93b	3.05a
	XY335	CK	10392.73a	695.20a	23.79a	16.00a	43.60a	23.24a	49.45a	1.67a
		CK+2℃	5552.95b	367.60b	24.38a	14.40a	25.40b	19.12b	40.31b	2.69a
		CK+4℃	202.61c	12.60c	25.04a	2.00b	6.30c	21.50b	24.57c	18.80b
变异来源 Source of variation	年际 Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	处理 Treatment		**	**	NS	**	**	**	**	**
	品种 Cultivar		**	**	**	**	**	NS	**	**
	年际×处理 Year×Treatment		NS	NS	*	NS	**	NS	NS	NS
	年际×品种 Year×Cultivar		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	品种×处理 Cultivar×Treatment		**	**	*	**	**	NS	**	**
	年际×处理×品种 Year×Treatment×Cultivar		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS 表示差异不显著 NS means no significance

和 41.07%；但穗行数和百粒重受增温影响较小（除 XY335 的 CK+4℃处理）。2 个品种间比较，XY335 对增温更为敏感，在 CK+4℃和 CK+2℃处理下其产量比 CK 降低 98.31%和 45.33%，CK+4℃处理几乎绝产，穗粒数则分别比 CK 减少 98.47%和 46.37%，行粒数分别比 CK 减少 87.90%和 43.78%，处理与对照间两两差异显著；XY335 的百粒重随温度增加略有增加，但差异不显著。ZD958 产量表现为 CK+4℃和 CK+2℃处理比 CK 降低 54.67%和 33.15%，穗粒数分别比 CK 减少 54.68%和 39.17%，行粒数分别比 CK 减少 56.03%和

38.30%，百粒重受增温影响较小。增温处理下 XY335 的穗粒降幅大于 ZD958，秃尖长增幅显著大于 ZD958。

对产量与茎秆农艺性状、力学特性进行相关分析可知（表 5），不同处理下玉米产量与株高、穗位高和地上部第三节间长度呈极显著负相关，与茎粗、截面惯性矩和抗推力呈极显著正相关，与破碎强度呈正相关，但在两品种之间表现不同，ZD958 产量与破碎强度呈极显著正相关，而 XY335 产量与其正相关，但不显著，这与 XY335 后期茎秆物质转运较少，破碎强度值随增温而升高有关。

表 5 不同处理下玉米产量与茎秆力学特性和农艺性状的相关性

Table 5 Correlation between yield and mechanical characteristics and agronomic trait in maize stalk under different treatments

	品种 Cultivar	株高 Plant height	穗位高 Ear height	茎粗 Stalk width	截面惯性矩 Moment of inertia	地上部第三节间长 3rd joint length	抗推力 Thrust resistance	穿刺强度 Puncture strength	破碎强度 Crushing strength
产量 Yield	ZD958	-0.928**	-0.961**	0.946**	0.919**	-0.960**	0.957**	0.578	0.899**
	XY335	-0.965**	-0.984**	0.923**	0.766*	-0.930**	0.965**	0.557	0.238

3 讨论

3.1 增温对玉米茎秆农艺性状的影响

玉米植株茎秆农艺性状与植株的抗倒伏能力密切相关，也是判断植株抗倒性的重要指标^[13-14]，苗期高温、穗期阴雨寡照、群体密度增加等均会导致玉米株高增加，茎基部变细，抗倒性显著降低^[21-24]，而通过喷施调节剂可以控制株高和节间长度，增强抗倒性^[34-35]。本研究表明，全生育期增温使玉米株高、穗位高和穗位系数显著增加，使茎粗明显变细，截面惯性矩变小，抗倒能力变差，这与人研究结果一致^[12,14]。本试验结果表明，增温显著增加了地上部第三节间长度、穗下节间和穗上节间的平均长度，且穗下节间长度比穗上节间长度对增温更为敏感；CK+4℃处理第三节间长度、茎粗系数的增加幅度明显大于 CK+2℃处理，而截面惯性矩的降幅则显著大于 CK+2℃处理和 CK，说明随温度增加，节间长度、茎粗系数增幅越大，截面惯性矩的降幅越大，茎秆抗倒性越差。综上，增温处理下玉米倒伏风险增加既与穗下节间长度、第三节间长度的显著加长有关，也与茎粗变细，截面惯性矩变小，茎粗系数增大有关，茎秆长度和粗度的协同变化是增温下茎秆倒伏风险增大的重要因素。不同类型品种表现为热敏感型品种 XY335 的株高、穗位高和穗下节间长度、茎粗系数的增幅均显著大于钝感型品种 ZD958，说明

未来气候变暖条件下热敏型品种对温度升高的响应更为敏感，也更易倒伏。

3.2 增温对玉米茎秆显微结构和力学特性的影响

玉米茎秆的显微结构（维管束数目、面积）与玉米茎秆抗倒性密切相关，尤其是茎秆中的小维管束数目对茎秆稳定性起着主要作用^[15]，而维管束数目和面积变化亦受到环境和措施的影响^[36-37]。本研究发现，随着处理温度增加，地上部第三节间中心和边缘维管束数量、维管束面积显著降低，边缘维管束排列疏松，靠近皮层的边缘小维管束层数减少且排列稀疏，且随温度增加，中心维管束数目和面积的降幅大于边缘维管束，说明增温条件下，皮层小维管束分布稀疏，导致茎秆皮层的坚韧性和稳定性降低；而中心维管束数目和面积的减少既降低了茎秆强度，也减少了茎秆水分和养分的输送能力，一定程度上降低了物质的运输速率。茎秆抗推力、穿刺强度和破碎强度可反映茎秆弹性、茎皮硬度与充实程度，这些力学特性指标能直接反映茎秆的物理机械强度，是衡量和评价茎秆的抗倒性重要指标^[18,25,38]。本研究结果表明，从玉米抽雄至成熟后 10 d，其茎秆的破碎强度、穿刺强度和抗推力的力学特性整体呈现单峰趋势；在玉米成熟期前，随着温度增加，茎秆抗推力、穿刺强度和破碎强度显著低于对照。结合力学特性和茎秆结构综合分析可知，温度越高，

茎秆的维管束面积和数目降幅越大, 茎秆强度和茎秆抗推力越弱, 这与前人的茎秆内维管束面积减少, 茎秆强度降低的结果是一致的^[16]。

增温处理下 2 个品种维管束结构和茎秆力学特性变化不同, XY335 的中心和边缘单个维管束面积均随温度升高而增加, ZD958 单个维管束面积则随温度升高而减少, 这可能是高温胁迫下热敏感型品种在茎秆结构上的补偿机制之一, 即通过增大单个维管束面积来弥补其高温造成的维管束数目的大量减少, 以增强水分和养分的运输, 减轻高温伤害; 尽管单个维管束面积增加有一定补偿性, 但其效果有限, 因为本研究结果表明, XY335 的茎横截面积上的总维管束面积仍表现为随温度增加而减少, 这与增温下茎粗显著变细有关。由此可见, 增温下敏感型品种一定程度上可以通过调节维管束数目与面积的平衡来适应温度升高的胁迫, 但调节补偿有限, 不足以弥补由茎粗变细带来的总维管束面积的减少。增温处理后敏感型品种 (XY335) 茎秆抗推力、维管束数目和边缘维管束总面积下降幅度大于 ZD958, 而穿刺强度、破碎强度和中心维管束总面积的下降幅度小于 ZD958, 究其原因可能是 XY335 对增温 (尤其高温胁迫) 较为敏感, 而本试验 2 年的 CK+4℃ 处理对其茎秆生长已构成高温伤害, 加之高温下维管束数目和总面积的减少, 使得茎秆内的物质运输受到抑制, 无法快速或正常运转到果穗, 致使大量碳水化合物滞留茎秆, 导致 CK+4℃ 处理 (高温) 下茎秆的穿刺强度虽比 CK 低, 但高于 CK+2℃ 处理。但增温处理下玉米茎秆物质组成、转运以及茎秆中皮层细胞形态和数量变化与茎秆力学特性的关系还有待于进一步深入研究。

3.3 增温处理下玉米茎秆抗倒特性的相关性分析及产量变化

玉米茎秆农艺性状、力学特性和显微结构均与茎秆抗倒能力密切相关, 且力学特性更是能直观反映茎秆的抗倒能力^[13,38-40]。综合本研究发现, 随温度增加, 茎秆抗推力与株高、穗位高和地上部第三节间长度呈极显著负相关, 与茎粗、截面惯性矩、边缘维管束数目、面积、中心维管束数目、面积呈极显著正相关; 穿刺强度与地上部第三节间长度呈显著负相关, 与茎粗呈显著正相关; 破碎强度与株高、穗位高、地上部第三节间长度呈极显著负相关, 与边缘维管束数目、面积、中心维管束面积呈极显著正相关, 与茎粗、截面惯性矩和中心维管束数目呈显著正相关。综合上述指标相关性, 发现增温下茎秆的抗倒性下降, 不是某个单一指标或特性的改变, 而是其农艺性状、力学特

性和显微结构共同作用的结果, 而其显微结构的变化最终在农艺性状和力学指标中体现出来。

随着温度增加, 玉米穗长显著降低, 穗粒数和行粒数显著减少, 秃尖长显著增加, 玉米产量下降, 但 XY335 的穗粒数和行粒数的降幅远超过 ZD958, 且在 CK+4℃ 处理几乎绝产, 说明该品种对温度增加反应敏感。增温处理下产量与株高、穗位高、地上部第三节间长度等农艺性状呈极显著负相关, 与茎粗、截面惯性矩、抗推力呈极显著正相关。综合产量构成、茎秆农艺、力学和结构特性可以看出, 高温 (CK+4℃) 处理下玉米产量的降低主要是穗粒数、行粒数等库容的减少, 由此导致茎秆中的物质无处运转, 大量滞留茎秆, 因此出现在 CK+4℃ 处理下茎秆的破碎和穿刺强度比 CK+2℃ 处理大。尽管本结果显示产量与农艺性状极显著负相关, 但其产量降低的根本原因与籽粒库容量的大幅度减少关系更为密切。未来全球气温升高情况下, 选育抗倒品种或评价品种抗倒性时, 既要关注株高、穗位高和地上部第三节间长度等农艺性状, 更应关注茎秆力学特性、显微结构; 增温下玉米产量的变化更应该关注籽粒库容的变化和物质流的运输状况。因此, 未来气候变暖, 既要注重耐高温品种的选择, 也应积极采用科学手段调控茎秆生长、果穗发育, 增强植株的抗倒性和结实性, 实现玉米稳产丰产。

4 结论

在全球气候变暖背景下, 温度升高 2—4℃, 显著增加了玉米茎秆节间长度, 尤其地上部第三节间长度和穗下节间长度, 增加了穗位系数和茎粗系数, 降低了茎粗。增温改变了茎秆的维管束数目和总面积, 显著降低茎秆抗推力、穿刺强度和破碎强度, 增加了倒伏风险, 且茎秆抗倒性与农艺性状、维管束结构密切相关, 不同类型品种茎秆的抗倒性、力学特性和显微结构特性对增温的响应程度存在较大差异。

参考文献 References

- [1] 陈印军, 王琦琪, 向雁. 我国玉米生产地位、优势与自给率分析. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 7-16.
- CHEN Y J, WANG Q Q, XIANG Y. Analysis of corn production status, superiority and self-sufficiency in China. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 7-16. (in Chinese)

- [2] ZANDAILINAS S I, MITTLER R, BALFAGON D, ARBONA V, GOMEZ-CADENAS A. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia Plantarum*, 2018, 162: 2-12.
- [3] KAMALI B, ABBASPOUR K C, WEHRLI B, YANG H. Drought vulnerability assessment of maize in Sub-Saharan Africa: Insights from physical and social perspectives. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 266-274.
- [4] 李树岩, 马玮, 彭记永, 陈忠民. 大喇叭口及灌浆期倒伏对夏玉米产量损失的研究. *中国农业科学*, 2015, 48(19): 3952-3964.
- LI S Y, MA W, PENG J Y, CHEN Z M. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19): 3952-3964. (in Chinese)
- [5] TOLLENAAR M, LEE E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, 2002, 88: 161-169.
- [6] KHOSRAVI G R, ANDERSON I C. Growth, yield, and yield components of ethephon-treated corn. *Plant Growth Regulation*, 1991, 10(1): 27-36.
- [7] 边大红, 刘梦星, 牛海峰, 魏钟博, 杜雄, 崔彦宏. 施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(12): 2294-2304.
- BIAN D H, LIU M X, NIU H F, WEI Z B, DU X, CUI Y H. Effects of nitrogen application times on stem traits and lodging of summer maize (*Zea mays* L.) in the Huang-Huai-Hai plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2294-2304. (in Chinese)
- [8] 冯波, 刘延忠, 董树亭, 高荣歧, 胡昌浩, 王空军. 高温对玉米种苗转化过程中关键水解酶活性及 ATP 含量的影响研究. *玉米科学*, 2006, 14(6): 86-89.
- FENG B, LIU Y Z, DONG S T, GAO R Q, HU C H, WANG K J. Effect of high temperature on the key hydrolytic enzyme activity and ATP content during petroleum seed-seedling transformation. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 86-89. (in Chinese)
- [9] 吴小娟, 杨雯, 解如, 张晓平. 高温胁迫对玉米品种‘郑单 958’幼苗生长及部分生理指标的影响. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(2): 117-119.
- WU X J, YANG W, XIE R, ZHANG X P. Effects of high temperature stress on growth and some physiological indexes of boast of *Zea mays* ‘Zhengdan 958’. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, 27(2): 117-119. (in Chinese)
- [10] 赵丽晓, 张萍, 王若男, 王璞, 陶洪斌. 花后前期高温对玉米强弱势籽粒生长发育的影响. *作物学报*, 2014, 40(10): 1839-1845.
- ZHAO L X, ZHANG P, WANG R N, WANG P, TAO H B. Effect of high temperature after flowering on growth and development of superior and inferior maize kernels. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1839-1845. (in Chinese)
- [11] 孙宁宁. 玉米叶、粒对高温胁迫的响应[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- SUN N N. Responses of maize leaf and kernel to heat stress[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [12] 郑东泽. 气象因素对寒地玉米生长发育、产量及品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- ZHENG D Z. Effects of meteorological factors on growth, yield and quality of maize in cold regions[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [13] PICKETT L K, LILJEDAHN J B, HAUGH G G, ULLSTRUP A J. Rheological properties of corn stalks subjected to transverse loading. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 1969, 12(3): 392-396.
- [14] 袁志华, 李云东, 陈合顺. 玉米茎秆的力学模型及抗倒伏分析. *玉米科学*, 2002, 10(3): 74-75.
- YUAN Z H, LI Y D, CHEN H S. Dynamic model and lodging resistance analysis of maize stem. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(3): 74-75. (in Chinese)
- [15] 王娜, 李凤海, 王志斌, 王宏伟, 吕香玲, 周宇飞, 史振声. 不同耐密型玉米品种茎秆性状对密度的响应及与倒伏的关系. *作物杂志*, 2011(3): 67-70.
- WANG N, LI F H, WANG Z B, WANG H W, LÜ X L, ZHOU Y F, SHI Z S. Response to plant density of stem characters of maize hybrids and its relationship to lodging. *Crops*, 2011(3): 67-70. (in Chinese)
- [16] 刘明, 齐华, 张卫建, 张振平, 李雪霏, 宋振伟, 于吉琳, 吴亚男. 深松方式与施氮量对玉米茎秆解剖结构及倒伏的影响. *玉米科学*, 2013, 21(1): 57-63.
- LIU M, QI H, ZHANG W J, ZHANG Z P, LI X F, SONG Z W, YU J L, WU Y N. Effects of deep loosening and nitrogen application on anatomical structures of stalk and lodging in maize. *Journal of Maize Science*, 2013, 21(1): 57-63. (in Chinese)
- [17] 李波, 张吉旺, 崔海岩, 靳立斌, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响. *作物学报*, 2012, 38(11): 2093-2099.
- LI B, ZHANG J W, CUI H Y, JIN L B, DONG S T, LIU P, ZHAO B. Effects of potassium application rate on stem lodging resistance of summer maize under high yield conditions. *Acta Agronomica Sinica*,

- 2012, 38(11): 2093-2099. (in Chinese)
- [18] 陈焯. 水稻抗茎倒伏的力学评价方法及抗倒因子的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- CHEN X. A method for the assessment of stem lodging resistance in rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [19] 勾玲, 赵明, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究. 作物学报, 2008, 34(4): 653-661.
- GOU L, ZHAO M, HUANG J J, ZHANG B, LI T, SUN R. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize (*Zea mays* L.). Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 653-661. (in Chinese)
- [20] 赵久然, 王荣焕. 美国玉米持续增产的因素及其对我国的启示. 玉米科学, 2009, 17(5): 156-159.
- ZHAO J R, WANG R H. Factors promoting the steady increase of American maize production and their enlightenments for China. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(5): 156-159. (in Chinese)
- [21] YORDANOVA R Y, POPOVA L P. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants. Acta Physiologiae Plantarum, 2007, 29(6): 535-541.
- [22] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 范霞, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 大田淹水对高产夏玉米抗倒伏性能的影响. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2440-2448.
- REN B C, ZHANG J W, LI X, FAN X, DONG S T, LIU P, ZHAO B. Effects of waterlogging on stem lodging resistance of summer maize under field conditions. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2440-2448. (in Chinese)
- [23] 李潮海, 栾丽敏, 尹飞, 王群, 赵亚丽. 弱光胁迫对不同基因型玉米生长发育和产量的影响. 生态学报, 2005, 25(4): 824-830.
- LI C H, LUAN L M, YIN F, WANG Q, ZHAO Y L. Effects of light stress at different stages on the growth and yield of different maize genotypes. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 824-830. (in Chinese)
- [24] 刘仲发, 勾玲, 赵明, 张保军. 遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响. 华北农学报, 2011, 26(4): 91-96.
- LIU Z F, GOU L, ZHAO M, ZHANG B J. Effects of shading on stalk morphological characteristics, rind penetration strength and lodging-resistance of maize. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 2011, 26(4): 91-96. (in Chinese)
- [25] 勾玲, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐, 赵明. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响. 作物学报, 2007, 33(10): 1688-1695.
- GOU L, HUANG J J, ZHANG B, LI T, SUN R, ZHAO M. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1688-1695. (in Chinese)
- [26] 李宾, 于宁宁, 王洪明, 任佰朝, 杨今胜, 张吉旺. 割苗对夏玉米生长发育、产量及抗倒伏性能的影响. 山东农业科学, 2019, 51(6): 55-61.
- LI B, YU N N, WANG H M, REN B C, YANG J S, ZHANG J W. Effects of cutting seedlings on growth, yield and lodging resistance of summer maize. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(6): 55-61. (in Chinese)
- [27] 王彦坡, 李昂, 杨豫龙, 孟恩, 潘利文, 朱暖暖, 刘天学. 割苗对河南省夏玉米生长及产量的影响. 河南农业科学, 2019, 48(4): 28-32.
- WANG Y P, LI A, YANG Y L, MENG E, PAN L W, ZHU N N, LIU T X. Effects of cutting seedlings on growth and yield of summer maize in Henan province. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(4): 28-32. (in Chinese)
- [28] RAFTERY A E, ZIMMER A, FRIERSON D M, STARTZ R, LIU P. Less than 2°C warming by 2100 unlikely. Nature Climate Change, 2017, 7: 637-641.
- [29] ROGELJ J, POPP A, CALVIN K V, LUDERER G, EMMERLING J, GERNAAT D, KREY V. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C. Nature Climate Change, 2018, 8(4): 325-332.
- [30] CAMPBELL C, ATKINSON L, ZARAGOZA-CASTELLS J, LUNDMARK M, ATKIN O, HURRY V. Acclimation of photosynthesis and respiration is asynchronous in response to changes in temperature regardless of plant functional group. New Phytologist, 2007, 176: 375-389.
- [31] TAO F L, ZHANG Z. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: Quantify the relative contributions of adaptation options. European Journal of Agronomy, 2010, 33: 103-116.
- [32] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PORTNER H O, ROBERTS D, SKEA J, SHUKLA P R. Special Report on Global Warming of 1.5°C. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [33] United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Climate Change Conference (Paris, UNFCCC).(2016-01-29)[2020-06-25]. <https://unfccc.int/documents/9097>.
- [34] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 刘月娥, 张译天, 刘秀芝, 赵久然, 王荣焕. 种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控. 中国农业科学, 2019, 52(4): 629-638.
- XU T J, LÜ T F, CHEN C Y, LIU Y E, ZHANG Y T, LIU X Z, ZHAO

- J R, WANG R H. Effects of plant density and plant growth regulator on stalk traits of maize and their regulation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 629-638. (in Chinese)
- [35] 裴志超, 兰宏亮, 徐田军, 陈传永, 董志强. 膦酸胆碱合剂对东北地区春玉米茎秆形态与质量性状的影响. *玉米科学*, 2011, 19(4): 59-64.
- PEI Z C, LAN H L, XU T J, CHEN C Y, DONG Z Q. Effect of ECK treatment on the stalk characters of spring maize in the Northeast China. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(4): 59-64. (in Chinese)
- [36] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 张吉旺, 赵斌, 董树亭, 刘鹏. 遮阴对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(17): 3497-3505.
- CUI H Y, JIN L B, LI B, ZHANG J W, ZHAO B, DONG S T, LIU P. Effects of shading on stalks morphology, structure and lodging of summer maize in field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(17): 3497-3505. (in Chinese)
- [37] 刘文彬, 冯乃杰, 张盼盼, 李东, 张洪鹏, 何天明, 赵晶晶, 徐延辉, 王畅. 乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1326-1334.
- LIU W B, FENG N J, ZHANG P P, LI D, ZHANG H P, HE T M, ZHAO J J, XU Y H, WANG C. Effects of ethephon and kinetin on lodging-resistance and yield of maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1326-1334. (in Chinese)
- [38] 靳英杰, 李鸿萍, 安盼盼, 程思贤, 赵向阳, 余天雨, 李潮海. 玉米抗倒性研究进展. *玉米科学*, 2019, 27(2): 94-98, 105.
- JIN Y J, LI H P, AN P P, CHENG S X, ZHAO X Y, YU T Y, LI C H. Research progress on the lodging resistance of maize. *Journal of Maize Science*, 2019, 27(2): 94-98, 105. (in Chinese)
- [39] 刘鑫, 谢瑞芝, 牛兴奎, 修文雯, 李少昆, 高世菊, 张凤路. 种植密度对东北地区不同年代玉米生产主推品种抗倒伏性能的影响. *作物杂志*, 2012(5): 126-130.
- LIU X, XIE R Z, NIU X K, XIU W W, LI S K, GAO S J, ZHANG F L. Effects of planting density on lodging resistance performance of maize varieties of different eras in North-East China. *Crops*, 2012(5): 126-130. (in Chinese)
- [40] 丁山, 张兆玉, 杨锦忠, 姜林平, 韩伟, 桑素平. 玉米茎秆力学性状的边际效应研究. *山东农业科学*, 2018, 50(11): 37-42.
- DING S, ZHANG Z Y, YANG J Z, JIANG L P, HAN W, SANG S P. Study on marginal effect of edge properties of maize stalk. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(11): 37-42. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)