

网络出版时间:2026-04-11

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260408.1544.008

干旱胁迫对滴灌春小麦抗倒伏能力及产量的影响

赫芳芳¹,王荣荣¹,张耀元¹,蒋桂英¹,柳林君¹,李彦德¹,徐红军²

(1. 石河子大学农学院,新疆石河子 832000; 2. 新疆农垦科学院作物研究所,新疆石河子 832000)

摘要:为明确生育期干旱胁迫对滴灌春小麦抗倒伏能力及产量形成的影响,采用裂区设计,以水分不敏感型品种新春6号(XC6)和水分敏感型品种新春22号(XC22)为主区,以生育期间干旱胁迫处理为副区,设置正常灌溉(CK,75%~80% FC,FC为田间持水量)、分蘖期和拔节期轻度干旱(T1,J1,60%~65% FC)以及分蘖期和拔节期中度干旱(T2,J2,45%~50% FC)5个处理。通过分析5个伸长节间(I1、I2、I3、I4、I5)形态特征及基部第二节间解剖结构,探讨干旱胁迫对滴灌春小麦抗倒伏能力和产量形成的调控效应。结果表明,J1处理显著改善了两品种的抗倒伏相关性状($P<0.05$)。与CK相比,J1处理下两品种5个伸长节间的茎粗、壁厚、茎秆充实度和抗折力分别提高1.89%~10.90%、15.38%~56.41%、47.84%~175.70%和18.98%~58.74%;基部第二节间大维管束和小维管束数目分别提高28.00%~34.62%和28.57%~38.10%,大维管束和小维管束面积分别提高92.88%~98.79%和45.60%~74.89%,机械组织厚度提高45.56%~59.11%,各节间抗倒伏指数提高26.67%~75.00%。壁厚、抗折力、茎秆充实度和抗倒伏指数均表现为自I1至I5依次下降。两品种比较,XC6在形态性状、维管束及机械组织方面具有优势,其各节间抗倒伏指数较XC22提高10.34%~80.00%,且对轻度干旱响应更积极。T1处理下两品种产量最高,其中XC6较XC22高5.74%。经相关分析与通径分析,穗长和I5节间壁厚对产量形成具有较大促进作用;在抗倒伏指数形成中,I1节间抗折力和壁厚起正向作用,而I2节间长度过长不利于抗倒伏。以上结果说明在新疆绿洲农业区,拔节期轻度干旱(J1)有助于提高滴灌春小麦茎秆抗倒伏能力,分蘖期轻度干旱(T1)有助于提高产量。

关键词:春小麦;干旱胁迫;茎秆;抗倒伏能力;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)05-0644-14

Effect of Drought Stress on Lodging Resistance and Yield of Spring Wheat under Drip Irrigation

HE Fangfang¹, WANG Rongrong¹, ZHANG Yaoyuan¹, JIANG Guiying¹,
LIU Linjun¹, LI Yande¹, XU Hongjun²

(1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Crop Research Institute, Xinjiang Agricultural Reclamation Academy, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To clarify the effects of drought stress during the growth period on lodging resistance and yield formation of drip-irrigated spring wheat, a split-plot experiment was conducted using a drought-insensitive cultivar Xinchun 6 (XC6) and a drought-sensitive cultivar Xinchun 22 (XC22) as the main plots, and drought stress treatments during the growth period as the subplots. Five treatments were established: normal irrigation (CK, 75%–80% FC, where FC represents field capacity), mild drought at the tillering and jointing stages (T1 and J1, 60%–65% FC), and moderate drought at the tillering and jointing stages (T2 and J2, 45%–50% FC). The morphological traits of five elongated internodes (I1, I2, I3, I4, and I5) and the anatomical structure of the second basal internode were an-

收稿日期:2025-05-05

修回日期:2025-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(32060422)

第一作者 E-mail:2749281562@qq.com(赫芳芳)

通讯作者 E-mail:jgy67@126.com(蒋桂英);xhj288@163.com(徐红军)

alyzed to evaluate the regulatory effects of drought stress on lodging resistance and yield formation in drip-irrigated spring wheat. The results showed that J1 significantly improved lodging resistance-related traits in both cultivars ($P < 0.05$). Compared with CK, stem diameter, wall thickness, stem filling degree, and breaking strength of the five elongated internodes increased by 1.89%–10.90%, 15.38%–56.41%, 47.84%–175.70%, and 18.98%–58.74%, respectively, under J1. For the second basal internode, the numbers of large and small vascular bundles increased by 28.00%–34.62% and 28.57%–38.10%, respectively; the areas of large and small vascular bundles increased by 92.88%–98.79% and 45.60%–74.89%, respectively; and mechanical tissue thickness increased by 45.56%–59.11%. Consequently, the lodging resistance index of each internode increased by 26.67%–75.00%. Wall thickness, stem filling degree, breaking strength, and lodging resistance index all decreased from I1 to I5. Compared with XC22, XC6 showed obvious advantages in morphological traits, vascular bundle traits, and mechanical tissue characteristics, resulting in 10.34%–80.00% higher lodging resistance index and more positive response to mild drought. Grain yield was highest under T1 for both cultivars, and XC6 yielded 5.74% more than XC22. Correlation and path analyses indicated that spike length and wall thickness of the I5 internode played greater roles in yield formation. For lodging resistance, breaking strength and wall thickness of the I1 internode had positive effects, whereas excessive length of the I2 internode was unfavorable. These results indicate that, in the oasis agricultural region of Xinjiang, mild drought at the jointing stage(J1) is beneficial for improving stem lodging resistance of drip-irrigated spring wheat, whereas mild drought at the tillering stage(T1) is more conducive to yield improvement.

Keywords: Spring wheat; Drought stress; Stem; Lodging resistance; Yield

2023 年新疆维吾尔自治区党委一号文件提出要增加小麦种植面积,主攻单产,提高总产,使新疆麦区在中国小麦供给体系中的地位进一步强化。截至 2023 年,新疆小麦种植面积 $120.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占中国小麦播种面积的 5.12%,总产为 $702.8 \times 10^7 \text{ kg}$, 占中国小麦总产的 5.15%^[1]。然而,新疆地处干旱区,春夏两季干旱频发,且生育前、中期干旱发生频率高达 80% 左右^[2]。因此,在新疆有限水资源条件下,提升滴灌小麦的节水稳产能力,是保障区域粮食安全与农业可持续发展的关键。

倒伏是限制小麦产量、品质和增加机械收获成本的重要因素^[3-4]。茎秆的抗倒伏性与株高、重心高度、基部节间长度、茎粗、壁厚、抗折力等形态力学性状密切相关,其中基部节间的结构与机械强度对倒伏风险具有决定性作用^[5-9]。研究表明,提高茎粗与茎壁厚可有效增强茎秆强度并降低倒伏发生^[10]。适度水分胁迫亦可能通过抑制基部节间伸长、促进节间加粗与增厚,提升抗倒伏能力并改善产量表现^[11]。从解剖结构看,机械组织厚度、维管束数量与面积、以及薄壁组织的木质化程度等,可较直观地表征茎秆抗倒伏潜力。茎秆壁

厚、机械组织厚度、薄壁组织厚度以及大小维管束的状况,是衡量茎秆强弱的重要指标。品种类型、取样节位与评价指标体系决定着茎秆维管束数量与面积的差异。通常抗倒伏小麦品种的茎秆基部节间木质化程度高,机械组织和大小维管束数量多,面积大^[12];机械强度高的小麦茎秆机械组织厚度大,但小维管束数量少,面积小^[13-14]。

目前,滴灌技术已成为新疆小麦生产的主要栽培方式。为追求高产,生产上常采用增密种植并配合“少量多次”的灌溉管理^[15],但高密度群体往往显著增加倒伏风险,进而造成产量损失,通常减产约 20%,严重时减产可达 40% 以上^[16]。在滴灌高密条件下,对于水分调控(尤其是关键生育期的干旱—复水过程)如何影响茎秆不同伸长节间的形态与解剖结构,并进一步调控抗倒伏能力与产量形成,目前仍缺乏系统研究。基于此,本研究以水分敏感性不同的两个春小麦品种为材料,在滴灌高密背景下设置分蘖期与拔节期轻度和中度干旱—复水处理,系统测定 5 个伸长节间的形态性状及基部第二节间的解剖特征,解析其对抗倒伏能力与产量形成的调控效应,旨在为协调滴灌密植高产与倒伏风险的矛盾、挖掘节水高产潜

力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2024年4—7月在新疆石河子市石河子大学农学院实验站(85°59'E, 44°18'N)进行。该地属典型温带大陆性气候区,多年平均气温7~

8℃,平均降水量125~207.7 mm,平均蒸发量1 140~1 600 mm。小麦生育期间的气象要素变化见图1。试验地土壤类型为灌溉灰漠土,供试0~40 cm土层理化性质:pH值7.6,全氮含量1.28 g·kg⁻¹,碱解氮含量54.32 mg·kg⁻¹,速效磷含量16.82 mg·kg⁻¹,速效钾含量138.24 mg·kg⁻¹,有机质含量15.14 g·kg⁻¹。

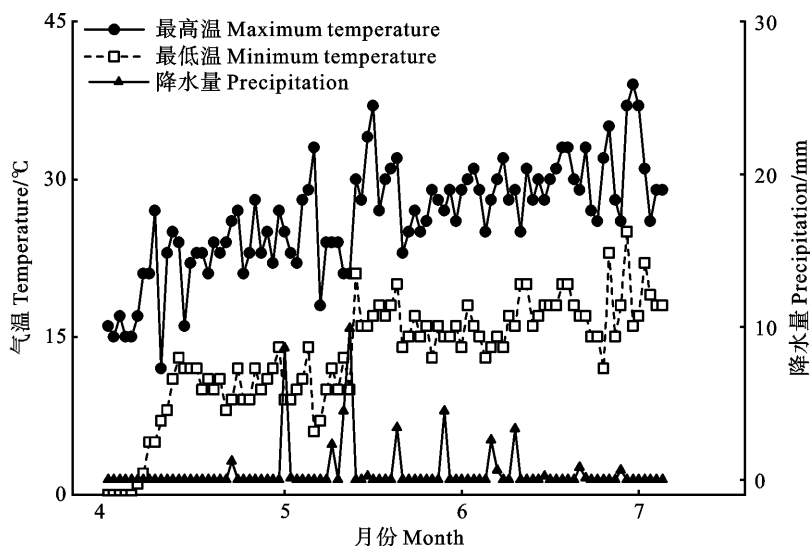


图1 春小麦生育期日最高、最低温度及降水量变化

Fig. 1 Changes in daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation during the growth period of spring wheat

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以品种为主区,干旱胁迫为副区。供试品种为水分不敏感型品种新春6号(XC6)和水分敏感型品种新春22号(XC22)。在分蘖期和拔节期分别设置5个干旱胁迫处理:正常灌溉(CK, 75%~80% FC, FC为田间持水量)、分蘖期轻度干旱(T1, 60%~65% FC)、分蘖期中度干旱(T2, 45%~50% FC)、拔节期轻度干旱(J1, 60%~65% FC)和拔节期中度干旱(J2, 45%~50% FC)。为保证轻度和中度干旱胁迫持续时间一致,中度干旱胁迫需提前5 d控制灌水,使土壤含水量降至目标水平。干旱胁迫持续8 d后复水,使土壤含水量恢复至75%~80% FC。每个处理3次重复。

小区面积为12 m² (3 m×4 m),小区间埋设100 cm深度的防渗膜,防止水肥外渗。小麦播量为345 kg·hm⁻²,人工播种。采取1管4行宽窄行种植,行间距为12.5+20+12.5+15 cm,每隔4行中间20 cm处铺设1条滴灌带,确保滴灌带平整无弯折(图2)。滴灌带管径16 mm,滴头间距30 cm,流量2.6 L·h⁻¹。试验所用氮肥为尿

素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),生育期共施入120 kg·hm⁻²的P₂O₅和纯N 255 kg·hm⁻²。氮肥基追比为3:7,追肥随滴灌水施入,分别于分蘖期(4月26日)、拔节期(5月14日)、孕穗—扬花期(5月21日)、灌浆期(6月10日)按照20:40:35:5比例施入。4月1日播种,7月4—6日收获。

土壤含水量变化采用Watermark电阻式水分张力感应器(model 200SS, USA)进行监测,传感器分别垂直埋入土壤20 cm与40 cm处测定水

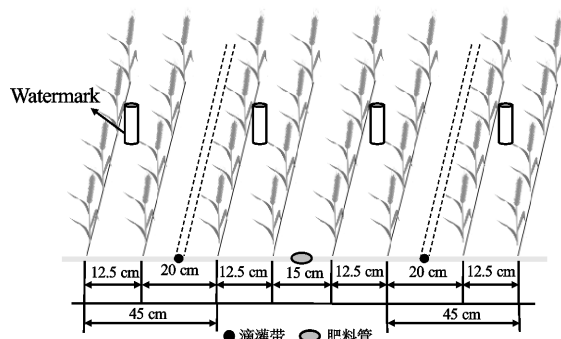


图2 小区田间布置图

Fig. 2 Field layout diagram of the experimental plots

分张力值。试验开始前,田间打钻取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层样品测定田间含水量,每处理重复 3 次,于每日 20:00 测其含水量并读取 Watermark 数值,得到 Watermark 读数与 0~40 cm 土层平均含水量占最大田间持水量比例的拟合曲线(图 3)。分蘖期、拔节期通过读取 Watermark 数值来确定灌水量,当土壤含水量低于目标含量时(轻度干旱灌溉下限为 60% FC,中度干旱的灌溉下限为 45% FC),通过公式计算灌水量再补灌至区间内。其他时期灌水同大田生产。灌水量计算公式: $m_i=10\rho_b H(\beta_l-\beta_j)$ 。式中: m_i 为灌水量(mm); ρ_b 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H 为土壤深度(cm),本试验计划控水深度 40 cm; β_l 为目标含水量(田间持水量 $\times$ 目标相对含水量,mm); β_j 为当前土壤含水量(mm)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎秆形态特征的测定与计算

分别于开花期、乳熟期、成熟期每小区随机取 10 株生长状况一致植株,参照 Tripathi 等^[17]的方法测定茎秆形态指标及茎秆充实度。茎秆基部至穗顶(不包含芒)的长度为株高;茎秆基部至整株(带有穗、叶和鞘)平衡支点的距离为重心高度;相邻两个节中点之间的距离为节间长度;茎粗和壁厚采用游标卡尺测定,茎粗为节间外径,壁厚=(外径-内径)/2;茎秆充实度(SS)=DW/IL,式中 DW 为节间干重(mg),IL 为节间长度(cm)。

1.3.2 茎秆解剖指标测定

于开花后 10 d,各小区随机选取 3 株植株,用双面刀片快速切取基部第二伸长节间中部约 2 cm 茎段,在 FAA 固定液中固定,采用石蜡切片法

制备切片,经脱蜡、番红和固绿染色、再次脱水及透明处理,最后用中性树脂封片。用切片扫描仪采集图像,通过 CaseViewer 扫描软件统计大小维管束数目和面积、机械组织厚度,并观察木质素沉积情况。

1.3.3 茎秆抗倒伏能力测定与计算

分别于开花期、乳熟期、成熟期每小区随机采取 10 株植株,参照 Peng 等^[5]的方法,用茎秆强度测定仪 YYD-1A(杭州托普仪器有限公司,中国)测定抗折力。将小麦茎秆分为 5 个节间,从基部到穗下依次为 I1、I2、I3、I4、I5(图 4),去除穗和叶片后将节间置于测定仪凹槽中,压力探头均匀施压至茎秆折断时所需的力值为该节间的抗折力(N)。抗倒伏指数=抗折力/重心高度。

1.3.4 产量及其相关性状测定

于成熟期各小区选取有代表性的样点 1 m²,人工收获。测定单位面积小麦穗数,从中随机选取 20 穗,测定穗粒数与穗长,所有收获的小麦穗均进行脱粒、干燥和称重,测定千粒重,并计算产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据预处理,使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行方差分析和通径分析,处理间差异显著性采用 Duncan's 多重比较法检验,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。采用 Origin 2024b 进行相关性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对滴灌春小麦形态指标的影响

2.1.1 株高、重心高度和节间长度的变化

两品种株高、重心高度及基部 5 个伸长节间

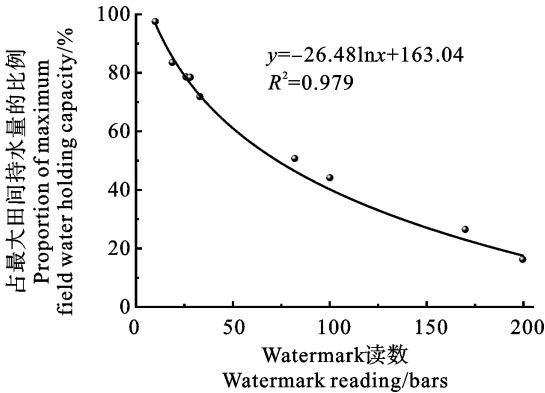


图 3 土壤含水量占最大田间持水量的比例与 Watermark 读数关系曲线

Fig. 3 Relationship between ratio of soil water content to maximum field capacity and Watermark reads

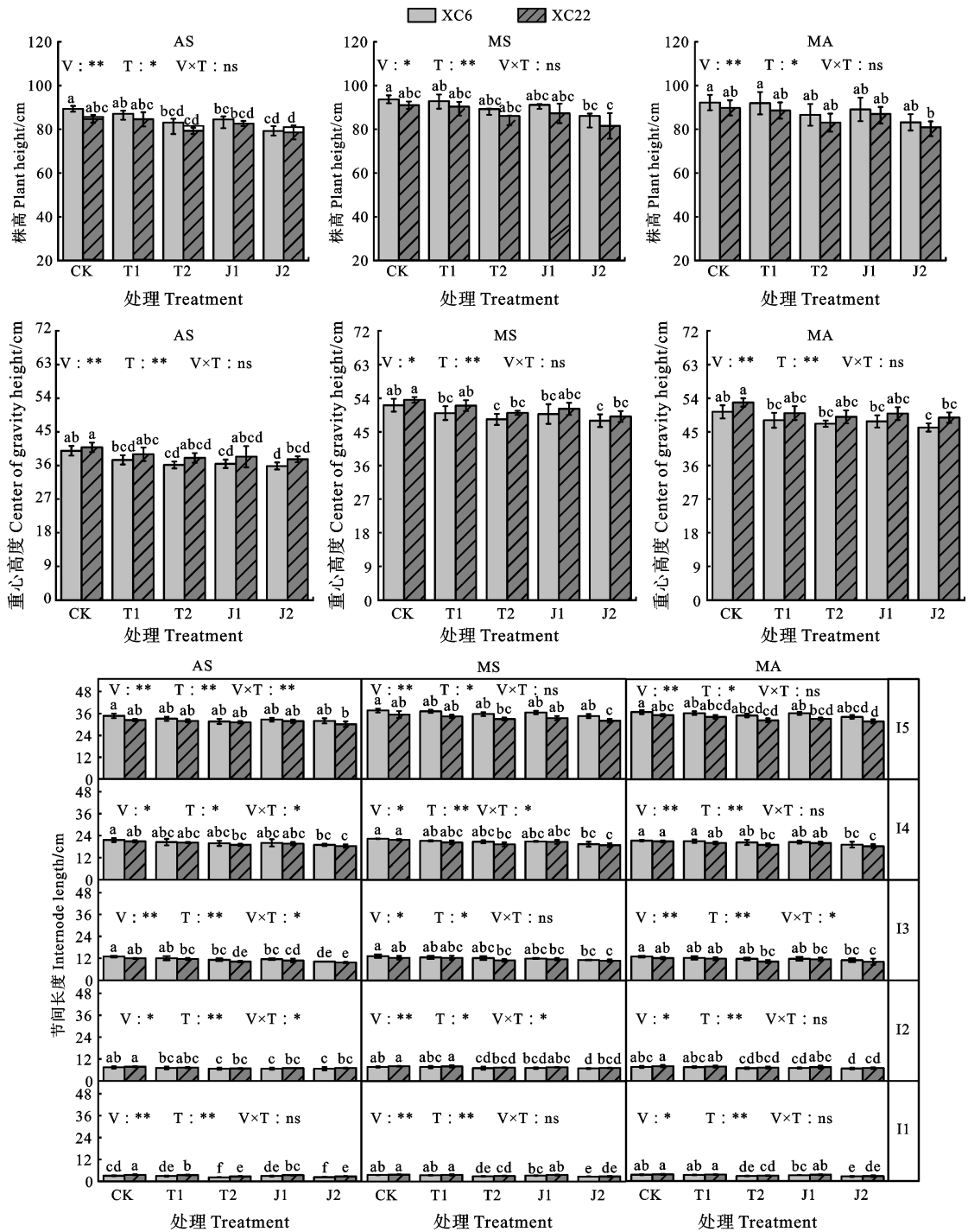


图 4 茎秆 5 个伸长节间示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the five elongated internodes of the stem

长度(I1~I5)总体表现为从开花期到乳熟期逐渐增加、成熟期略有下降的变化趋势(图 5)。不同水分处理下,上述指标大小整体均表现为 CK>T1>J1>T2>J2,说明随着干旱程度加重,株高、

重心高度及各节间长度均呈下降趋势。与 CK 相比,各干旱处理下株高、重心高度及 I1~I5 节间长度分别下降 0.21%~11.27%、2.88%~10.15% 和 0.37%~27.69%。品种间比较表明,XC6 株高



V: 品种; T: 处理; V×T: 品种×处理。AS: 开花期; MS: 乳熟期; MA: 成熟期。不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著; ns 表示差异不显著。下同。

V: Variety; T: Treatment; V×T: Variety × Treatment interaction. AS: Anthesis stage; MS: Milk stage; MA: Maturity period. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. * and ** indicate significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns indicates no significant difference. The same in figures 6, 7, and 9.

图 5 干旱胁迫对春小麦株高、重心高度和节间长度的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on plant height, center of gravity height and internode length of spring wheat

较 XC22 高 0.65%~5.42%,而重心高度较 XC22 降低 2.30%~5.45%。从节间分配特征看,XC6 的 I1 和 I2 节间长度较 XC22 分别缩短 3.25%~18.38%和 1.78%~6.48%,而 I3~I5 节间长度则增加 1.03%~14.20%,表明 XC6 表现出下部节间缩短、上部节间相对伸长的特征。品种和干旱处理对株高、重心高度及各节间长度均

产生显著或极显著影响($P<0.05$ 或 $P<0.01$);品种与处理的交互作用对株高和重心高度影响不显著,但对部分节间长度产生显著影响。

2.1.2 茎粗、壁厚的变化

随生育进程推进,两品种各节间茎粗和壁厚整体均呈下降趋势(图 6)。品种间比较表明,XC6 各节间茎粗和壁厚总体上高于 XC22,二者

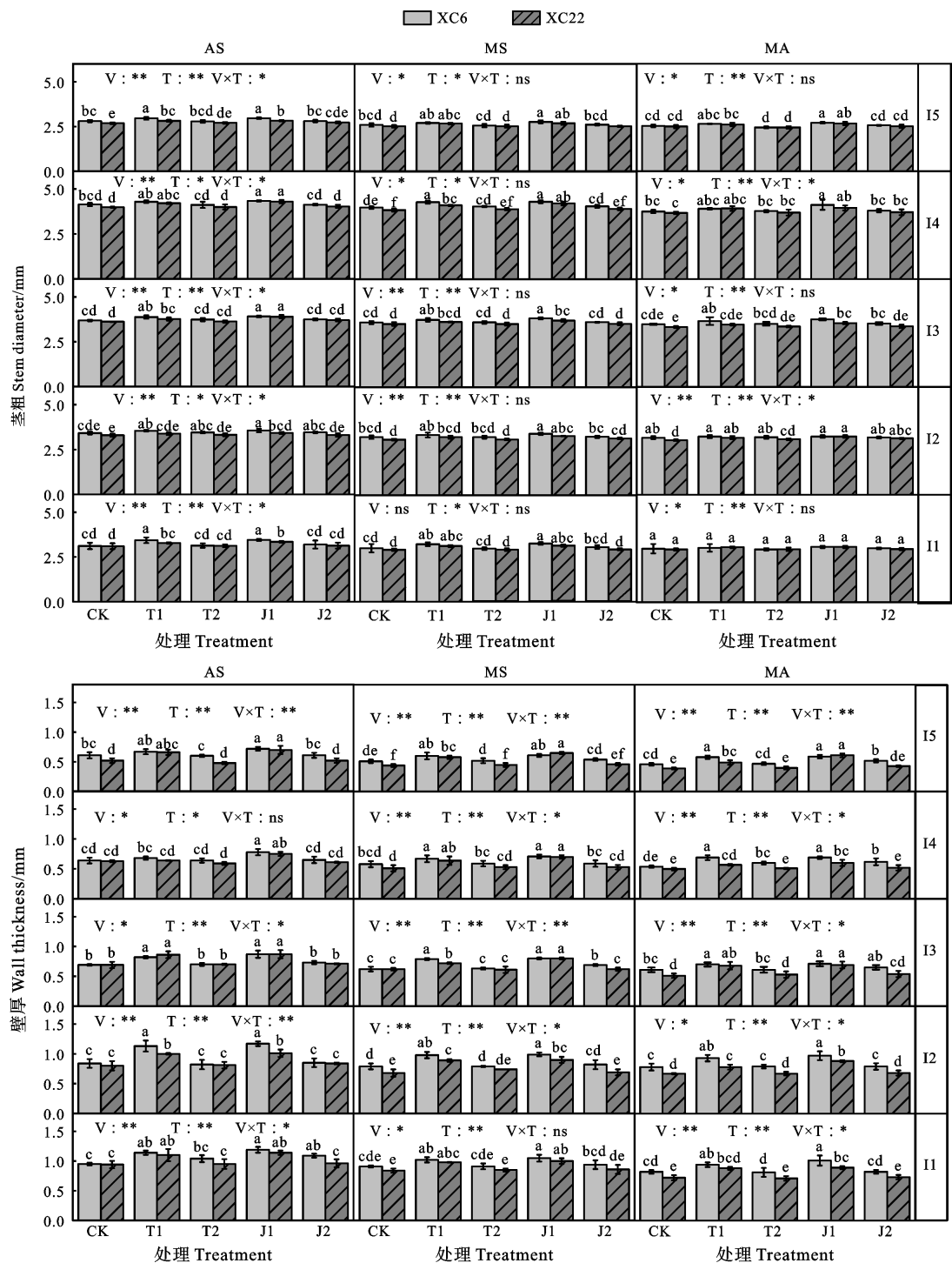


图 6 不同生育时期干旱胁迫对春小麦各节间茎粗和壁厚的影响

Fig. 6 Effects of drought stress on stem diameter and wall thickness of each internode of spring wheat at different growth stages

差异幅度分别为 -0.98% ~ 5.92% 和 -6.15% ~ 25.00% 。在不同干旱处理下,两品种小麦各节间茎粗和壁厚总体以J1处理较高,T1次之。与CK相比,J1处理下XC6和XC22各节间茎粗分别增加 1.89% ~ 10.90% 和 3.94% ~ 9.64% ,壁厚分别增加 15.38% ~ 39.29% 和 19.05% ~ 56.41% 。从节间差异看,两品种小麦茎粗大小均表现为 $I4>I3>I2>I1>I5$;在J1处理下,XC6和XC22 I1~I3和I5节间茎粗较I4分别降低 9.57% ~ 55.59% 和 10.26% ~ 56.51% 。两品种小麦壁厚大小均表现为 $I1>I2>I3>I4>I5$;在J1处理下,XC6和XC22的I1壁厚较其余节间分别高出 1.71% ~ 72.13% 和 1.14% ~ 62.86% 。干旱处理对各节间茎粗和壁厚的影响达到显著或极显著水平,品种、干旱处理及其交互作用对部分节间茎粗和壁厚亦产生显著或极显著影响。

2.1.3 茎秆充实度的变化

两品种各节间茎秆充实度随生育进程推进均呈下降趋势,整体表现为开花期>乳熟期>成熟期(图8)。品种间比较表明,XC6各节间茎秆充实度总体高于XC22,增幅为 0.43% ~ 81.56% 。不同干旱处理下,两品种各节间茎秆充实度总体以J1处理较高,T1次之。与CK相比,J1处理下XC6和XC22各节间茎秆充实度分别提高 55.40% ~ 128.72% 和 47.84% ~ 175.70% 。从节间分布

看,I1茎秆充实度最高;在J1处理下,与I1相比,XC6和XC22的I2~I5节间茎秆充实度分别降低 6.52% ~ 55.67% 和 22.15% ~ 60.94% 。品种和干旱处理对各节间茎秆充实度均具有显著或极显著影响,二者交互作用对部分节间茎秆充实度的影响亦达到显著或极显著水平。

2.2 干旱胁迫对滴灌春小麦维管束性状以及木质化程度的影响

基部第二节间横截面观察表明,XC6木质化程度总体高于XC22(图8、表1)。不同干旱处理下,大小维管束数目、大小维管束面积及机械组织厚度总体均以J1处理最高,T1次之。与CK相比,J1处理下两品种小麦大维管束数目提高 28.00% ~ 34.62% ,小维管束数目提高 28.57% ~ 38.10% ,大维管束面积提高 92.88% ~ 98.79% ,小维管束面积提高 45.60% ~ 74.89% ,机械组织厚度提高 45.56% ~ 59.11% 。品种比较显示,XC6的大维管束数目、大维管束面积、小维管束面积和机械组织厚度较XC22分别提高 3.85% ~ 9.38% 、 4.72% ~ 13.88% 、 6.07% ~ 38.79% 和 2.41% ~ 18.08% ,小维管束数目则与XC22持平或略低,降幅最大为 11.11% 。品种和干旱处理对大小维管束数目、大小维管束面积及机械组织厚度均产生显著或极显著影响,而二者互作效应仅对小维管束数目和小维管束面积产生极显著影响。

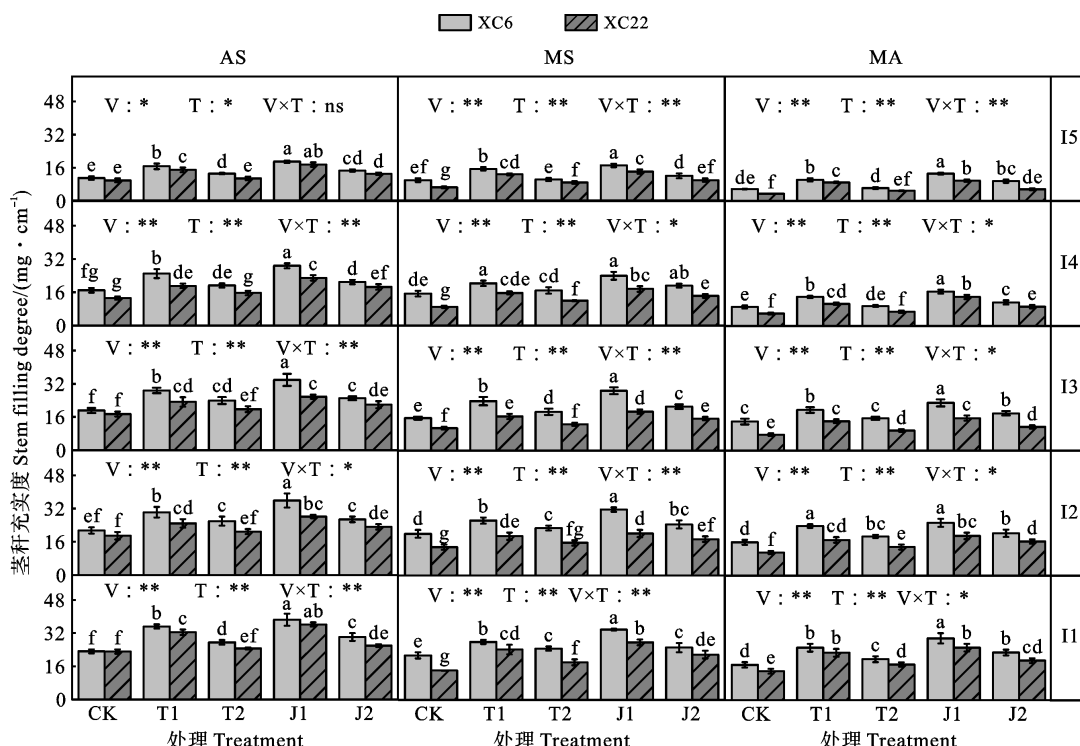


图7 不同生育时期干旱胁迫对春小麦各节间茎秆充实度的影响

Fig. 7 Effects of drought stress on stem filling degree of each internode of spring wheat at different growth stages

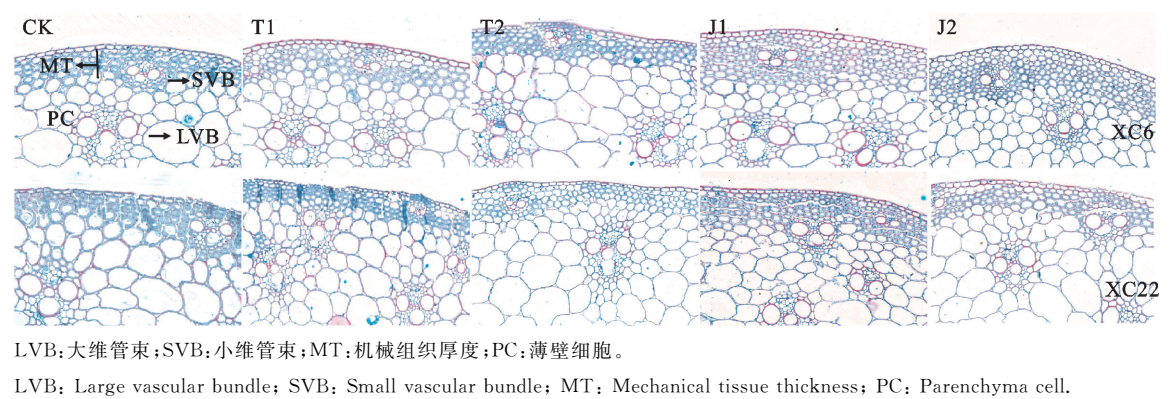


图 8 干旱胁迫下春小麦基部第二节间木质化程度

Fig. 8 Lignification degree in the second basal internode of spring wheat under drought stress

表 1 干旱胁迫对春小麦基部第二节间维管束及机械组织性状的影响
Table 1 Effects of drought stress on vascular bundle and mechanical tissue traits
in the second basal internode of spring wheat

品种 Variety	处理 Treatment	大维管束数目 Number of large vascular bundles	小维管束数目 Number of small vascular bundles	大维管束面积 Area of large vascular bundles/ μm^2	小维管束面积 Area of small vascular bundles/ μm^2	机械组织厚度 Mechanical tissue thickness/ μm
XC6	CK	26de	21d	12 420gh	2 230ef	62.83ef
	T1	29c	24c	18 090c	3 460b	78.47bc
	T2	27d	15f	14 240ef	2 410de	67.17e
	J1	35a	27b	24 690a	3 900a	99.97a
	J2	27d	19e	15 750de	2 620cd	76.03cd
XC22	CK	25e	21d	11 240h	1 930f	58.16g
	T1	27d	27b	16 710cd	2 730cd	70.21de
	T2	25e	16f	13 120fg	2 210ef	65.59ef
	J1	32b	29a	21 680b	2 810c	84.66b
	J2	26de	20de	15 040de	2 470de	67.23e
F 值 F value	品种 V	*	* *	*	* *	*
	处理 T	*	* *	* *	* *	* *
	品种 V $\times$ 处理 T	ns	* *	ns	* *	ns

* : $P<0.05$; * * : $P<0.01$; ns: No significune. The same in table 2.

2.3 干旱胁迫对滴灌春小麦抗倒伏能力的影响

两品种小麦各节间抗折力随生育进程推进呈下降趋势(图 9)。XC6 各节间抗折力总体高于 XC22,增幅为 6.39%~73.51%。不同干旱处理下,两品种各节间抗折力总体表现为 J1>T1>J2>T2>CK,其中 J1 处理最高。与 CK 相比,J1 处理下 XC6 和 XC22 各节间抗折力分别提高 18.98%~48.26%和 20.71%~58.74%。从节间分布看, I1 抗折力最高;在 J1 处理下,与 I1 相比,XC6 和 XC22 其余节间抗折力分别降低 10.78%~63.24%和 8.10%~57.89%,呈现明显的节位效应。品种和干旱处理对各节间抗折力产生显著或极显著影响,二者互作效应对部分节间抗折力的影响亦达到显著或极显著水平。

随着生育进程推进,两品种各节间抗倒伏指数总体呈下降趋势,表现为开花期>乳熟期>成熟期。XC6 各节间抗倒伏指数总体高于 XC22,增幅为 10.34%~80.00%。不同干旱处理下,两品种各节间抗倒伏指数总体表现为 J1>T1>J2>T2>CK。与 CK 相比,J1 处理显著提高各节间抗倒伏指数,其中 XC6 和 XC22 分别提高 26.67%~62.00%和 27.27%~75.00%。同一处理不同节间间比较表明,抗倒伏指数表现为 I1>I2>I3>I4>I5;在 J1 处理下,与 I1 相比,XC6 和 XC22 I1~I5 节间抗倒伏指数分别降低 9.52%~62.00%和 8.11%~56.76%。品种、干旱处理及其互作效应对抗倒伏指数的影响均达到显著或极显著水平。

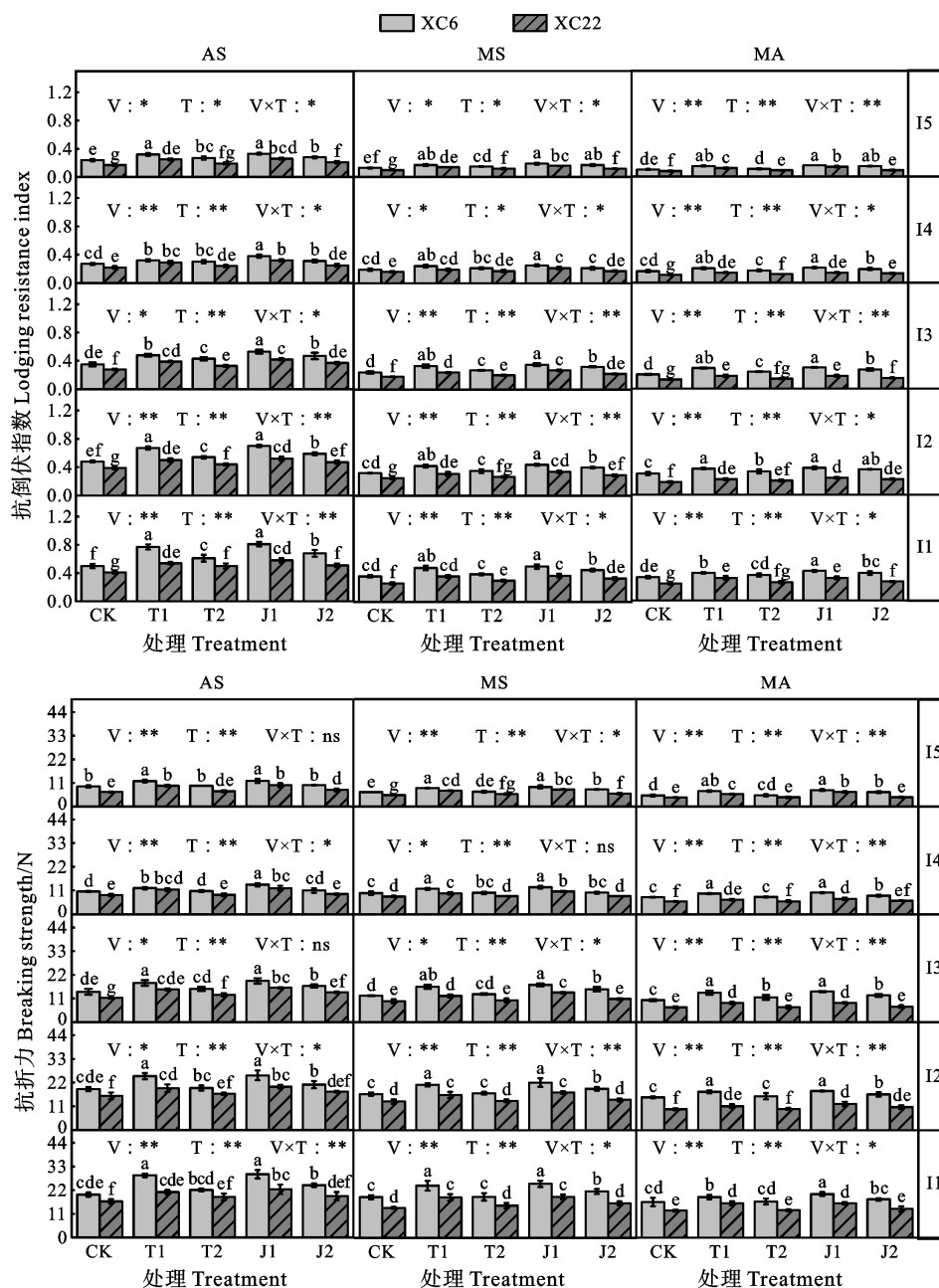


图 9 不同生育时期干旱胁迫对春小麦各节间抗折力和抗倒伏指数的影响

Fig. 9 Effects of drought stress on breaking strength and the lodging resistance index of each internodes in spring wheat at different growth stages

2.4 干旱胁迫对滴灌春小麦产量及其构成的影响

2.4.1 产量及其相关性状的变化

XC6 产量大小表现为 $T1 > J1 > CK > T2 > J2$, XC22 则表现为 $T1 > CK > J1 > T2 > J2$ (表 2)。T1 处理下, XC6 产量较 XC22 高 5.74%。与 CK 相比, T1 处理下 XC6 和 XC22 产量分别提高 8.67% 和 6.03%。从产量相关性状看, T1 处理下 XC6 和 XC22 穗长较 CK 分别提高 16.08% 和 13.11%, 穗粒数分别增加 6.76% 和 2.33%, 千粒重分别提高 2.43% 和 4.78%。但不同干旱

处理下, 两品种穗数均低于 CK, 其中 XC6 和 XC22 较 CK 分别减少 0.53%~13.80% 和 1.88%~15.72%。品种对穗长、千粒重和产量影响显著或极显著, 干旱处理对穗长、穗数、穗粒数、千粒重和产量影响显著或极显著, 二者互作效应仅对产量影响显著。

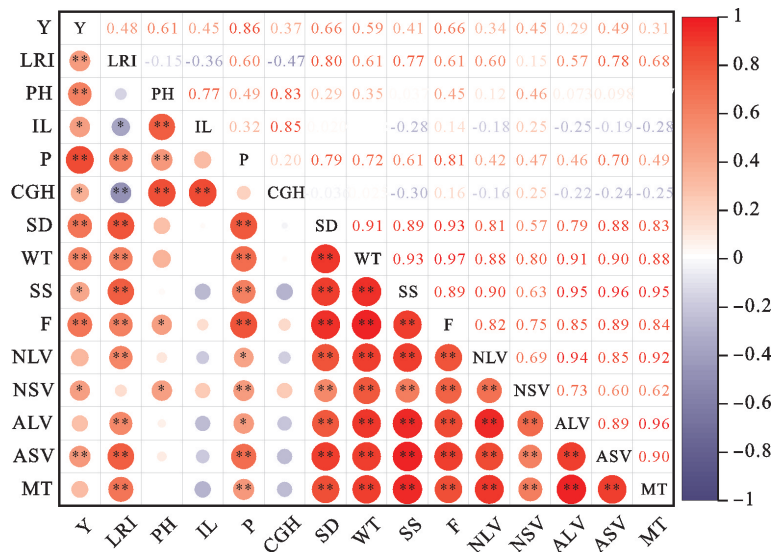
2.4.2 产量与形态、解剖相关性通径分析

相关分析结果(图 10)表明, 产量与抗倒伏指数、株高、节间长度、穗长、茎粗、壁厚、茎秆充实度、抗折力、小维管束数目和小维管束面积呈显著

表 2 干旱胁迫对滴灌春小麦产量及其相关性状的影响

Table 2 Effects of drought stress on yield and related traits of drip-irrigated spring wheat

品种 Variety	处理 Treatment	穗长 Spike length/cm	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 Thousand kernel weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
XC6	CK	9.64bcd	451.84a	37.26abc	47.82ab	6 937.41abc
	T1	11.19a	449.46a	39.78a	48.98a	7 538.62a
	T2	9.53bcd	400.62cd	34.42bcd	44.61abc	6 470.21cd
	J1	10.71ab	408.88abc	38.26ab	47.14ab	7 053.96abc
	J2	9.21d	389.48d	33.22cd	43.02bc	6 032.14de
XC22	CK	9.38cd	448.78a	38.56ab	45.56ab	6 723.86bc
	T1	10.61abc	440.34ab	39.46a	47.74ab	7 129.09ab
	T2	9.27d	407.61abc	34.36bcd	42.96ab	5 684.92ef
	J1	9.45cd	415.08abc	36.88abcd	46.24ab	6 064.52de
	J2	8.78d	378.24d	32.61d	39.58c	5 384.34f
F 值 F value	品种 V	*	ns	ns	*	**
	处理 T	*	**	**	**	**
	品种 V $\times$ 处理 T	ns	ns	ns	ns	*



Y:产量;LRI:抗倒伏指数;PH:株高;IL:节间长度;P:穗长;CGH:重心高度;SD:茎粗;WT:壁厚;SS:茎秆充实度;F:抗折力;NLV:大维管束数目;NSV:小维管束数目;ALV:大维管束面积;ASV:小维管束面积;MT:机械组织厚度。

Y: Yield; LRI: Lodging resistance index; PH: Plant height; IL: Internode length; P: Spike length; CGH: Center of gravity height; SD: Stem diameter; WT: Wall thickness; SS: Stem filling degree; F: Breaking strength; NLV: Number of large vascular bundles; NSV: Number of small vascular bundles; ALV: Area of large vascular bundles; ASV: Area of small vascular bundles; MT: Mechanical tissue thickness.

图 10 干旱胁迫下春小麦产量与抗倒伏相关指标的相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of spring wheat yield and lodging resistance index under drought stress

或极显著正相关;抗倒伏指数与穗长、茎粗、壁厚、抗折力、茎秆充实度、大维管束数目、大小维管束面积及机械组织厚度呈显著或极显著正相关,而与节间长度和重心高度呈显著或极显著负相关。

分别以产量(Y_1)和抗倒伏指数(Y_2)为因变量、抗倒伏相关指标为自变量进行逐步回归,建立了最优拟合方程: $Y_1 = -125.037 + 634.526X_3 + 53.261X_{6-5}$ ($R^2 = 0.722^{**}$); $Y_2 = 0.119 +$

$0.015X_{8-1} - 0.025X_{2-2} + 0.135X_{6-1}$ ($R^2 = 0.977^{**}$)。 Y_1 和 Y_2 的决定系数分别为 0.722 和 0.977(表 3),说明相关形态和解剖指标对产量及抗倒伏指数具有较强解释能力。根据回归系数和通径系数结果,穗长及第五节间壁厚对产量形成具有重要促进作用,第一节间抗折力和壁厚对抗倒伏指数具有正向作用,而第二节间长度则表现为负向作用。

表 3 干旱胁迫下产量与抗倒伏相关参数通径分析

Table 3 Parameter path analysis of yield and lodging resistance under drought stress

因变量 Dependent variable	作用因子 Factor	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					决策系数 Decision coefficient
			X_3	X_{2-2}	X_{6-1}	X_{6-5}	X_{8-1}	
Y_1	X_3	0.839					0.564	0.564
	X_{6-5}	0.147				0.322		0.322
Y_2	X_{8-1}	0.797		0.033	0.147			0.180
	X_{2-2}	-0.137			-0.019		-0.191	0.210
	X_{6-1}	0.180		-0.011			0.147	0.158

X_3 : 穗长; X_{2-2} : 第 2 节间长度; X_{6-1} : 第 1 节间壁厚; X_{6-5} : 第 5 节间壁厚; X_{8-1} : 第 1 节间抗折力; Y_1 : 产量; Y_2 : 抗倒伏指数。
 X_3 : Spike length; X_{2-2} : Length of internodes 2; X_{6-1} : Wall thickness of internodes 1; X_{6-5} : Wall thickness of internodes 5; X_{8-1} : Breaking strength of internodes 1; Y_1 : Yield; Y_2 : Stem lodging resistance index.

3 讨论

3.1 干旱胁迫下滴灌春小麦形态特征与抗倒伏能力及产量的关系

滴灌技术凭借精准供水和少量多次灌溉的优势,已成为现代农业节水增产的重要手段。适宜的水分调控不仅有利于改善群体生长状况,还可通过调节茎秆形态建成提高小麦抗倒伏能力与产量^[18]。已有研究表明,作物在适度水分胁迫下可形成一定的适应性响应,从而增强后期对逆境的抵抗能力^[19];小麦经适度干旱锻炼后,抗旱性增强,并可在一定条件下实现稳产增产^[20]。小麦茎秆形态特征也是决定抗倒伏能力的重要基础,其中株高、重心高度、节间长度、茎粗、壁厚和茎秆充实度均与倒伏发生密切相关。一般而言,株高和重心高度越大,茎秆承受弯曲力矩越大,倒伏风险越高^[21-22]。Hu 等^[23]认为,株高主要受节间数目和节间长度共同影响,且节间长度与倒伏指数显著相关。本研究表明,随着生育进程推进,小麦基部 5 个伸长节间的茎粗、壁厚、茎秆充实度和抗折力总体呈下降趋势,而株高、重心高度和节间长度则表现为先升高后略有下降。随着干旱胁迫加重,株高、节间长度和重心高度总体降低,说明水分亏缺抑制了营养生长和节间伸长。J1 处理并未削弱茎秆支撑能力,反而促进了抗倒伏相关形态指标的优化。与 CK 相比,J1 处理下两品种茎粗、壁厚、茎秆充实度和抗折力均有不同程度提高,表明适度前期控水有利于形成更加紧凑、坚实的茎秆结构。其原因可能是生育前期适当降低供水促使根系向下生长,同时抑制地上部过旺伸长,使节间缩短、茎壁加厚、组织充实度增加,从而形成“矮壮型”株型,降低重心高度并提高基部节间

机械强度,为后期抗倒伏奠定基础。品种间比较表明,XC6 在多数抗倒伏相关形态指标上优于 XC22。虽然 XC6 株高略高于 XC22,但其较低的重心高度与基部节间长度在一定程度上弥补其相对较高的株高,通过优化节间分配使其抗倒伏能力并未受到明显影响。这表明本研究条件下株高不是限制倒伏的主要指标,节间分配方式和基部结构强度同样关键。换言之,较高的株高可在一定程度上被更合理的重心配置和更强的基部支撑能力所补偿,这也可以看出 XC6 的补偿恢复能力大于 XC22。从节间差异看,茎粗大小表现为 $I_4 > I_3 > I_2 > I_1 > I_5$,而壁厚、茎秆充实度、抗折力和抗倒伏指数大小均表现为 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4 > I_5$,其原因可能是 I_4 处于中部生长旺盛区域,生长限制小,因而茎粗表现最突出; I_1 作为基部支撑,需具备更强的机械强度,促使其加厚细胞壁并积累更多物质。这说明不同节间在结构功能上具有明显分工:中部节间生长活跃,茎粗较大;基部第一节间作为主要承重部位,则通过增加壁厚和物质积累来强化机械支撑。在一定范围内,株高和节间长度适度增加,能够为光合作用创造更有利的条件,从而促进产量提升^[24-25]。从穗数形成来看,滴灌既能保证小麦分蘖所需的水分供应,又能避免因水分过量引发的无效分蘖,可较传统灌溉提高 10%~15% 的成穗率^[26],少量多次滴灌可有效促进小花分化和发育,减少小花退化,进而增加穗粒数^[27]。滴灌技术能够在灌浆期实现少量多次供水,维持土壤含水量在 65%~70% 田间持水量,保证小麦籽粒灌浆过程顺利进行,从而使千粒质量提高 2~3 g^[26]。有研究发现,减少滴灌量,可使春小麦有效穗数、穗粒数、千粒重分别较充分灌溉处理提高 2.99%、2.14% 和 0.70%,增产

3.81%^[28]。本研究发现,两品种在 T1 处理下虽穗数略低于 CK,但穗粒数提高 2.33%~6.76%,千粒重提高 2.43%~4.78%,实现增产。相关和通径分析表明,选育穗长较长且第五节间壁厚高的品种有利于增产,而抗倒伏品种需具备有第一节间抗折力强、壁厚的特性,同时避免第二节间过长,为品种改良提供“长穗、基部强韧、第二节间短缩”的精准选育方向。

3.2 干旱胁迫下滴灌春小麦解剖结构与抗倒伏能力及产量的关系

茎秆中机械组织和维管束结构是机械支撑的主要来源。已有研究表明,抗倒伏小麦品种的茎秆基部节间机械组织和大小维管束数量多,面积大^[29-30]。本研究中,滴灌调控下的大小维管束数目、面积以及机械组织厚度均为轻度干旱胁迫表现更优,不同品种的第二节间解剖结构响应存在显著差异。J1 处理下,两品种基部第二节间大小维管束数目较 CK 处理增加 28.00%~38.10%,大小维管束面积增加 45.60%~98.79%,机械组织厚度增厚 45.56%~59.11%。XC6 小维管束数目比 XC22 低,这可能与大维管束扩张的空间限制有关。相关分析表明,抗倒伏指数与大维管束数目、大小维管束面积、机械组织厚度呈显著或极显著正相关,抗折力与大小维管束数目、面积以及机械组织厚度均呈现极显著正相关。机械组织厚度直接关乎抗折力,当受到外界弯折力时,更厚的机械组织能更好地分散应力,提升茎秆机械强度^[31]。大维管束面积大有利于光合产物高效运输至茎秆各处,为细胞生长和物质积累提供充足原料,促进茎秆充实度提升,即更多光合产物被储存于茎秆组织中,增加茎秆充实度。有研究发现,小维管束数目与抗倒伏指数呈极显著负相关^[29],而本研究中二者无相关性,可能是由于不同地区生态地区环境不同所致。外部栽培调控可通过改善茎秆壁厚、节间充实度、机械组织厚度、维管束面积及木质化程度,提高小麦茎秆抗倒伏能力并缓解逆境造成的产量损失^[32]。此外,不同作物的茎秆解剖研究也表明,维管束数量及其空间配置与抗倒伏行为密切相关,其中单位面积维管束数量增加有助于增强茎秆支撑能力^[33]。因此,机械组织厚、大小维管束面积大的茎秆在面对外界干扰时更难倒伏^[34],本研究结果与其相似。维管束相关性状与产量形成密切相关。研究发现,基部节间维管束较多,有利于茎秆干物质质量向籽粒的

转运,从而提高籽粒产量^[35]。从产量形成的角度来看,XC6 通过维管束结构与机械组织木质化形成较明显的抗倒优势:大维管束数目增加可保障孕穗期水分供给,支撑穗粒数、千粒重的提升,同时,机械组织厚度增厚,且木质化程度显著提高,可使植株将更多的光合产物分配至穗部用于产量形成,减少倒伏风险。两品种均在 T1 处理下产量最佳,XC6 较 XC22 高出 5.74%,这充分表明茎秆解剖结构特征与产量之间存在着紧密的联系,即小维管束数目可适度减少,通过强化大维管束输导效率与茎秆机械强度,构建“高效运输—抗倒保产”的产量形成路径。综合来看,滴灌条件下适度、阶段性的干旱胁迫可通过优化小麦茎秆的形态建成和解剖结构,提高基部节间机械强度和抗倒伏能力,并通过改善穗部性状和物质运输效率促进产量形成。本研究主要从形态与解剖特征角度分析了不同生育时期亏水调控对小麦抗倒伏性和产量的影响,后续仍需进一步结合茎秆力学参数、物质转运特征及不同生态条件验证其作用机制,以更系统地揭示滴灌小麦抗倒伏与高产协同形成的结构基础。

4 结论

本研究条件下,适度干旱胁迫可以提高小麦的产量及抗倒伏能力。与 XC22 相比,XC6 表现出更强的补偿恢复能力,其抗倒伏能力和产量总体较高。拔节期轻度干旱有助于提高各伸长节间茎粗、壁厚、充实度以及基部第二节间大、小维管束数目及面积和机械组织厚度,进而增强抗折力、同时适度降低株高与重心高度,提高小麦茎秆抗倒伏指数;分蘖期轻度干旱有助于提高穗长、穗粒数和千粒重,进而增加产量。

参考文献:

- [1] 中国统计年鉴中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社,2023.
China Statistical Yearbook, the National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2023.
- [2] 祁嘉郁,巴特尔·巴克. 基于水分亏缺指数的北疆春小麦不同生育阶段干旱时空特征[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(4):171.
QI J Y, BATTEL B. Temporal and spatial characteristics of drought in different growth stages of spring wheat in northern Xinjiang based on crop water deficit index [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2021,39(4):171.

- [3] WU L F, HAN X W, ISLAM S, *et al.* Effects of sowing mode on lodging resistance and grain yield in winter wheat [J]. *Agronomy*, 2021, 11(7): 1378.
- [4] KAMRAN M, AHMAD I, WU X R, *et al.* Application of paclobutrazol: A strategy for inducing lodging resistance of wheat through mediation of plant height, stem physical strength, and lignin biosynthesis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(29): 29366.
- [5] PENG D L, CHEN X G, YIN Y P, *et al.* Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 1.
- [6] 柴亚茹, 李召锋, 刘新玲, 等. 新疆春小麦品种资源抗倒性评价[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(1): 73.
CHAI Y R, LI Z F, LIU X L, *et al.* Analysis and evaluation of lodging resistance of spring wheat cultivars in Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(1): 73.
- [7] 赵小红, 白羿雄, 姚有华, 等. 禾谷类作物茎秆特性与茎倒伏关系的研究[J]. 植物生理学报, 2021, 57(2): 258.
ZHAO X H, BAI Y X, YAO Y H, *et al.* Research progress on the relationship between stem characteristics and crop stem lodging [J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(2): 258.
- [8] LUO X Y, WU Z F, FU L, *et al.* Responses of the lodging resistance of indica rice cultivars to temperature and solar radiation under field conditions [J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2603.
- [9] JIANG H, JIANG Z X, ZHANG H C, *et al.* Silicon nutrition improves lodging resistance of rice under dry cultivation [J]. *Plants*, 2025, 14(3): 361.
- [10] ARGENTA J, PACHECO M T, DE ARAUJO MARIATH J E, *et al.* Morphological, anatomical, and chemical characteristics associated with lodging resistance in *Avena sativa* [J]. *Euphytica*, 2022, 218(3): 22.
- [11] 郝树荣, 潘永春, 董博豪, 等. 灌排模式对超级稻南粳 5055 抗倒伏能力的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 15.
HAO S R, PAN Y C, DONG B H, *et al.* The resistance of super rice *Oryza sativa* L. Nanjing 5055 to lodging under different irrigation and drainage [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 15.
- [12] KONG E Y, LIU D C, GUO X L, *et al.* Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat [J]. *The Crop Journal*, 2013, 1(1): 43.
- [13] MUHAMMAD A, HAO H H, XUE Y L, *et al.* Survey of wheat straw stem characteristics for enhanced resistance to lodging [J]. *Cellulose*, 2020, 27(5): 2469.
- [14] ZHENG M J, CHEN J, SHI Y H, *et al.* Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41805.
- [15] 蒋桂英, 魏建军, 刘萍, 等. 滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 50.
- JIANG G Y, WEI J J, LIU P, *et al.* Spring wheat growth and water use efficiency under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6): 50.
- [16] BERRY P M, SPINK J. Predicting yield losses caused by lodging in wheat [J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 19.
- [17] TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N, *et al.* Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging: Effects of genotypes, N levels and ethephon [J]. *Field Crops Research*, 2003, 84(3): 271.
- [18] 周宇. 农业现代化下小麦种植技术与病虫害防治措施[J]. 河北农业, 2025(5): 54.
ZHOU Y. Wheat planting techniques and pest control measures under agricultural modernization [J]. *Hebei Agriculture*, 2025(5): 54.
- [19] SURALTA R R, YAMAUCHI A. Root growth, aerenchyma development, and oxygen transport in rice genotypes subjected to drought and waterlogging [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64(1): 75.
- [20] 张乾惠, 霍一帆, 董梦琪, 等. 不同程度、频率干旱锻炼对冬小麦水分生产力的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1515.
ZHANG Q H, HUO Y F, DONG M Q, *et al.* Effects of different degrees and frequencies of drought exercise on water productivity in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(12): 1515.
- [21] LI B, GAO F, REN B Z, *et al.* Lignin metabolism regulates lodging resistance of maize hybrids under varying planting density [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(8): 2077.
- [22] LIU L L, LIANG G L, LIU W H, *et al.* Variation and inter-relationships in the growth, yield, and lodging of oat under different planting densities [J]. *PeerJ*, 2024, 12: e17310.
- [23] HU K M, CAO J B, ZHANG J, *et al.* Improvement of multiple agronomic traits by a disease resistance gene *via* cell wall reinforcement [J]. *Nature Plants*, 2017, 3: 17009.
- [24] 杨志雪, 米俊珍, 刘景辉, 等. 不同裸燕麦品种抗倒能力及产量差异分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5): 605.
YANG Z X, MI J Z, LIU J H, *et al.* Analysis of toppling resistance and yield difference of different naked oat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(5): 605.
- [25] 王庆国, 张学鹏, 林松明, 等. 不同株高玉米配置对玉豆复合种植模式下玉米光合特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(9): 51.
WANG Q G, ZHANG X P, LIN S M, *et al.* Effects of different plant height configurations on photosynthetic characteristics and yield of maize under corn-soybean complex planting pattern [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57(9): 51.
- [26] 聂福霄. 小麦浅埋滴灌高产节水技术应用研究[J]. 种子科技, 2025, 43(8): 65.
NIEF X. Study on application of high yield and water saving

technology of shallow buried drip irrigation for wheat [J]. *Seed Science & Technology*, 2025, 43(8):65.

[27]邵雪志,吴强,康健,等.滴灌次数和滴水量对春小麦产量和水分利用的影响[J].麦类作物学报,2025,45(2):253.

SHAO X Z, WU Q, KANG J, *et al.* Effects of drip irrigation frequency and drip irrigation amount on yield and water use efficiency of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(2):253.

[28]罗崇贤.景电灌区不同滴灌量对春小麦产量和水分利用效率的影响[J].现代农业科技,2024(13):16.

LUO C X. Effects of different drip irrigation amount on yield and water use efficiency of spring wheat in jingdian irrigation area [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(13):16.

[29]邱磊,李艳欣,张校哈,等.优质抗倒伏水稻新品种龙桦3特性及抗倒性状分析[J].种子科技,2023,41(16):24.

QIU L, LI Y X, ZHANG X H, *et al.* Analysis on characteristics and lodging resistance of a new rice variety Longhua 3 with good quality and lodging resistance [J]. *Seed Science & Technology*, 2023, 41(16):24.

[30]梁莹莹,钱子燕,肖长春,等.水稻籼粳交后代抗倒伏性状的遗传及配合力分析[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(5):587.

LIANG Y Y, QIAN Z Y, XIAO C C, *et al.* Genetic correlation and combining ability of lodging resistance in offspring of indica-Japonica hybrid rice [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2024, 53(5):587.

[31]胡昊,李莎莎,华慧,等.不同小麦品种主茎茎秆形态结构特征及其与倒伏的关系[J].麦类作物学报,2017,37(10):1343.

HU H, LI S S, HUA H, *et al.* Research on stalk morphological structure characteristics and its relationship between with the lodging of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10):1343.

[32]CHEN X, LIU Q Q, ZHENG B Q, *et al.* Optimized phosphorus application enhances wheat stem lodging resistance under spring low-temperature stress [J]. *Plants*, 2024, 13(21):2980.

[33]SREEJA R, ARUL L, BAPU K J, *et al.* Culm anatomy revealed association of vascular bundle number and silicon content with lodging behaviour in Kodo millet (*Paspalum scrobiculatum* L.) [J]. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2019, 57(12):893.

[34]ZHANG W J, WU L M, WU X R, *et al.* Erratum to: 'lodging resistance of Japonica rice (*Oryza sativa* L.): Morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates' [J]. *Rice*, 2016, 9(1):35.

[35]LI G H, CHEN X, ZHOU C Y, *et al.* Vascular bundle characteristics of different rice varieties treated with nitrogen fertilizers and its relation to stem assimilates allocation and grain yield [J]. *Agriculture*, 2022, 12(6):779.