

播期和种植密度对小麦基部节间性状 与抗倒指数的影响

袁雅妮¹, 闫素辉¹, 刘良柏², 王平信², 邵庆勤¹, 张从宇¹, 李文阳¹

(1.安徽科技学院 农学院,安徽 凤阳 233100;2.安徽华成种业股份有限公司,安徽 宿州 234000)

摘要 为分析播期和密度对小麦茎秆抗倒能力的调控效应,本试验以华成 3366 为材料,设置正常播期和晚播两个播期处理,各播期下分别设置 225 万株/hm²、375 万株/hm²、525 万株/hm² 3 个种植密度,研究了播期和密度及其互作对小麦产量、株高及基部节间形态学指标、力学特征、化学成分、解剖结构的影响,以明确播期和密度对小麦茎秆抗倒性能的调控效应。结果表明,随着种植密度的增加,小麦产量呈上升趋势。基部节间直径和节间干重的减少,从而导致茎粗系数和节间充实度的降低。半纤维素含量、纤维素含量、N 素含量随种植密度的增加而增加。抗折力、针刺力随密度的增加而下降,小麦抗倒伏指数逐渐降低。K 素含量也随密度的增加而下降。晚播可以降低植株高和重心高,有效增强小麦倒伏;同时增加小麦植株茎粗系数和节间充实度。晚播条件下的纤维素、木质素、K 素含量都显著高于正常播期。相关分析表明抗倒伏指数与基部节间干重、节间直径、K 素含量和薄壁组织呈显著正相关,与 N 素含量呈显著负相关。本研究条件下小麦可以通过提高基部节间干重、节间直径,增加基部节间 K 素含量、薄壁组织,降低基部节间 N 素含量来增强其抗倒性能。

关键词 小麦;播期;种植密度;基部节间;抗倒能力

中图分类号 S 512.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Effect of Planting Density and Sowing Date on Characteristics of Basal Internode and Lodging Resistance in Wheat

YUAN Yani¹, YAN Suhui¹, LIU Liangbai², WANG Pingxin²,
SHAO Qingqin¹, ZHANG Congyu¹, LI Wenyang¹

(1.School of Agriculture, Anhui University of Science and Technology, Fengyang 233100, China;

2. Anhui Huacheng Seed Industry Co. Ltd, Suzhou 234000, China)

Abstract This experiment is to analyze the regulatory effects of sowing date and planting density on lodging resistance of wheat stalks. The wheat variety Huacheng 3366 was used in this study. There were two sowing dates of normal sowing date and late sowing date, and three planting densities of 2.25 million plants / hm², 3.75 million plants / hm² and 5.25 million plants / hm² in this study. The experiment studied the effects of sowing date, density and their interaction on wheat yield, plant height and morphological indexes,

收稿日期:2020-09-04

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300408,2017YFD0301301);安徽自然科学基金项目(1408085MC48,1408085QC54)资助

通信作者:闫素辉,女,汉族,博士,教授,研究方向:小麦高产优质栽培技术,E-mail: liwy@ahstu.edu.cn;李文阳,男,汉族,博士,教授,研究方向:作物高产优质栽培,E-mail: liwy@ahstu.edu.cn.

mechanical characteristics, chemical composition, and anatomical structure of wheat. These are to clarify the regulatory effects of sowing date and density on lodging resistance of wheat stems. The results showed that the wheat yield increased as planting densities increased as planting densities increased from 2.25 to 5.25 million plants /hm². Internode external diameter and internode dry weight decreased as planting densities increased, resulting in a decrease in stem diameter coefficient and filling degree of internodes. Hemicellulose content, cellulose content, and N content increase with the increase of planting density. The break force and acupuncture force decrease with the increase of plant density, and the lodging resistance index of wheat also gradually decreases. The K content also decreases with the increase of density. Late sowing can reduce plant height and high center of gravity, effectively enhance wheat lodging; at the same time increase wheat plant stem diameter coefficient and Filling degree of internodes. The contents of cellulose, lignin and K element under the condition of late sowing are significantly higher than the normal sowing date. The correlation analysis showed that the lodging resistance index were positively correlated with the base internode dry weight, internode diameter, K content and parenchymatous tissue, but negatively correlated with the N content. In this research, wheat can increase its lodging resistance by increasing the dry weight and diameter of the base internodes, increasing the K content and parenchymatous tissue of the base internodes, and reducing the N content of the base internodes.

Key words wheat; sowing date; planting density; basal internode; lodging resistance

倒伏是作物生产中面临的严峻问题之一。倒伏引起小麦减产的幅度在 20%-30%，严重时减产达到 50% 以上^[1]。沿淮地区属于过渡性气候带，半湿润地区，受南北气候过渡带影响，北方干冷气流与南方暖湿气流常在安徽省内交汇，南北降水量差异性大，沿淮地区降水量达到 800-1000 mm^[2]，特别是在小麦生育后期易遇到强对流天气，小麦易发生倒伏^[3]，而且大量的降水会使小麦吸收过多的水分，根部土壤也会松动，更加加重了小麦倒伏的可能性。在小麦的生产当中，为了提高产量，往往会增加播种密度和增施氮肥，然而播种量较大导致基本苗多，通风透光不好，个体发育较差，以及施肥的不合理，导致遇到风雨就易发生倒伏。

国内外学者在外界条件对小麦倒伏有着大量的研究^[3-6]，但在农艺性状、化学物质、解剖结构等方面有着不同的研究^[7,8]。胡昊等^[9]研究表明茎秆第 2 节间粗度和壁厚与抗倒伏指数有着显著相关性；有学者研究表明木质素含量与倒伏率、倒伏指数之间存在极显著的负相关性^[10,11]，表明茎秆中积累较多的木质素可增大茎秆的抗折力，但也有学者研究小麦木质素含量高而倒伏性弱^[12]；郭建文等^[13]报道，增加 K 素含量可以提高抗倒伏指数。邵庆勤等^[14]研究表明，抗倒伏指数与大维管束个数、维管束面积、薄壁组织厚度、机械组织所占比例的相关性不大。可见，前人关于小麦基部茎秆性状与抗倒能力关系的研究，结论不一。

随着全球变暖，各地区经济作物种植面积随之扩大，小麦生长季节经常遭遇冬季冻害，春季倒春寒，干旱、渍涝，由于种种气候因素，小麦晚播将成为我国的一种种植趋势。延迟播期可以通过降低小麦重心高来增加植株抗倒性，关于种植密度对小麦抗倒性能的影响，密度低抗倒伏能力强，群体有效穗少，籽粒产量较低^[15]，但增大密度就会导致小麦重心高增加，增加植株倒伏风险，因此适宜的播种密度能是小麦植株保持较好的抗倒性与产量。李东升等^[16]研究表明，播期的推迟对小麦倒伏影响不显著，而卞爱群^[17]研究得出，播期推迟可有效提高抗倒性能，在种植密度方面，研究显示，随着密度的增加，小麦植株抗倒伏指数呈下降趋势。

本研究以小麦品种华成 3366 为材料，设置不同播期与种植密度处理，研究播期与种植密度对华成 3366 基部茎秆农艺性状、力学特性、解剖结构、非结构性碳水化合物等的影响，进而分析抗倒指数与茎秆农艺性状等参数的关系，为小麦抗倒伏品种选育与栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2018-2019 年在科技种植园(凤阳)进行。以小麦品种华成 3366 为材料，试验设 2 个播期，正常

播期(2018年10月27日)和晚播(2018年11月14日),并在每个播期下设3个密度(D1:225万/hm²、D2:375万/hm²、D3:525万/hm²),试验田前茬作物为玉米,试验随机区组设计,3次重复,小区面积为3 m×3 m=9 m²。在开花期取样,并对基部第二节间进行相关性状测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 株高及基部节间形态学指标测定。于乳熟期在每个小区选取长势均匀一致的15株小麦单茎,测量其形态特征。株高:用钢尺测量从茎秆基部到穗部顶端的距离。重心高度:将完整单株水平放置在稳定的支点上,使小麦保持水平的点称为重心,从茎秆基部至该茎秆重心的距离为重心高度。节间长:除去叶和叶鞘,用钢尺测量第二节间长度。直径、壁厚:用游标卡尺测量基部第二节间直径和壁厚。鲜重、干重:鲜重由田间取得鲜样,取基部二节间进行称重;将已称重的基部二节间放入烘箱内,烘箱温度105℃杀青30min,在80℃烘干至恒重、称重,即基部节间干重^[1]。

1.2.2 茎秆力学特征测定。每个处理在三个重复选出15株生长情况一致的小麦单茎,剥除倒二节间的茎鞘,使用YDD-1茎秆强度测定仪(浙江托普仪器有限公司)分别测定倒二节间抗折力、针刺力,抗倒伏指数=抗折力/重心高。

1.2.3 基部二节间化学成分的测定。纤维素、半纤维素、木质素:将基部二节间在105℃杀青60min后80℃烘干至恒质量,粉碎、过筛,参照Van等^[18]的方法测定半纤维素、纤维素及木质素含量。矿物质成分:烘干样品研磨或粉碎后加浓硫酸双氧水消煮,用比色法测量全氮含量^[19],火焰光度计法测定钾素含量。

1.2.4 解剖结构的测定。参照Kaack等^[20]的方法进行观察测定,将小麦基部二节间中部2-3cm切断,用无水乙醇与冰醋酸溶液(体积比3:1)固定,10h后取出保存于70%酒精中,用于观察茎秆的解剖结构。使用刀片将茎秆中部切薄片并转移至培养皿,挑出厚薄均匀的切片在光学显微镜(Olympus, BX53REC, 日本)下观察,统计维管束数目,通过OPTPro显微图像软件分析维管束大小、机械组织厚度和薄壁组织厚度。

1.2.5 产量测定。成熟期在各小区内选取长势均匀一致的区域,数取小麦穗数、穗粒数、在成熟期进行测产,每个小区收取1m²,晒干脱粒,测定千粒重。

1.3 数据分析与处理

采用Excel 2003和DPS7.05软件统计分析数据,采用LSD法进行差异显著性检验(差异显著性为0.05),采用相关分析处理。

表1 不同播期和密度下小麦籽粒产量及构成因素

播期	密度	穗数/万穗·hm ⁻²	穗粒数/粒	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
NS	D1	509.80±18c	36.49±0.54a	45.58±0.34b	8334.05±507.44a
	D2	580.00±3.46ab	32.77±0.25b	44.86±0.12bc	8835.17±524.74a
	D3	598.70±26.86a	31.40±1.52bcd	43.09±0.21d	8321.23±155.55a
LS	D1	362.70±51.97e	32.36±2.35bc	47.88±0.34a	4913.26±70.37d
	D2	448.00±24.26d	29.98±0.78cd	44.50±0.18bcd	5978.47±425.87c
	D3	526.20±34.11bc	29.76±1.31d	43.77±0.19cd	6848.84±435.01b
	播期	60.35**	18.11**	5.31*	185.05**
F值	密度	23.77**	12.22**	25.73**	9.67**
	播期×密度	2.28	1.12	4.15*	9.29*

注:同列内数据后不同小写字母表示差异5%显著水平,*、**分别表示差异达到0.05和0.01显著水平。

2 结果与分析

2.1 产量及产量构成因素

由表1可以看出,在同一播期下,随着密度的增加,穗数呈现上升的趋势,而穗粒重、千粒重呈下降趋势,均达到显著水平,而产量在正常播期下呈现先上升后下降的趋势,晚播条件下呈上升趋势。对于晚播处理下

的穗数、穗粒数,显著低于正常播期处理,产量在整体上也显著低于正常播期处理。正常播期条件下,D2 处理小麦籽粒产量较高;晚播条件下,D3 处理小麦籽粒产量较高。播期和密度对穗数、穗粒数、千粒重及产量均达到极显著水平,对千粒重和产量的互作效应达到显著水平。

2.2 植株高与重心高

由表 2 可知,播种期对小麦植株高、重心高有显著影响,与正常播期处理相比,晚播处理小麦植株高、重心高显著降低。不同种植密度对小麦植株高无显著影响,但对小麦重心高有显著影响,即随着密度的增加,重心高有增加趋势,由此得出,晚播可降低植株高与重心高,相同播期中,株高和重心高均在 D3 水平中达到最高。

表 2 种植密度对小麦植株高与重心高的影响

播期	密度	植株高/cm	重心高/cm
NS	D1	70.86±1.69a	39.44±0.95ab
	D2	71.13±2.63a	40.17±1.24a
	D3	72.73±2.82a	40.39±2.46a
LS	D1	62.38±1.23b	35.82±0.62c
	D2	63.54±2.00b	37.98±1.28b
	D3	64.16±2.82b	38.15±2.67b
F 值	播期	190.84**	37.10**
	密度	3.20	5.54**
	播期×密度	0.28	1.13

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.3 茎粗系数

由表 3 所示,播种期对小麦节间长、节间直径无显著影响。不同种植密度对节间长无显著影响,但对小麦节间直径有显著影响,随着密度的增加,节间直径整体呈现下降的趋势。随着种植密度的增加,小麦植株茎粗系数逐渐下降;同一密度条件下,晚播处理小麦植株茎粗系数较正常播期处理高。

表 3 种植密度对基部二节间茎粗系数的影响

播期	密度	节间长/cm	节间直径/mm	茎粗系数
NS	D1	7.79±0.89a	3.76±0.22ab	0.48
	D2	7.92±0.83a	3.72±0.13ab	0.47
	D3	7.47±0.77a	3.47±0.21c	0.46
LS	D1	7.55±1.26a	3.79±0.35a	0.5
	D2	7.66±1.13a	3.76±0.19ab	0.49
	D3	7.47±1.01a	3.54±0.25bc	0.47
F 值	播期	0.65	0.57	
	密度	0.81	6.81**	
	播期×密度	0.18	0.03	

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.4 不同播期和密度对节间充实度的影响

由表 4 得知,播种期对小麦基部节间壁厚有显著影响,晚播处理下的节间壁厚显著低于正常播,密度对节间壁厚无显著影响。播种期对小麦基部节间干重无显著影响;随着种植密度的增加,小麦植株节间干重逐渐下降。随着种植密度的增加,小麦植株节间充实度逐渐下降,晚播处理小麦植株节间充实度较正常播期处理高。

表 4 种植密度对基部二节间充实度的影响

播期	密度	节间壁厚/mm	节间干重/mg	节间充实度/mg·mm ⁻²
NS	D1	0.74±0.15a	203.7±10.19	3.525
	D2	0.71±0.13a	166.7±8.33	2.95
	D3	0.72±0.16a	155.0±7.75	2.883
LS	D1	0.55±0.15b	206.7±10.34	5.009
	D2	0.49±0.14b	186.0±9.3	4.989
	D3	0.5±0.1b	146.7±7.34	3.936
F 值	播期	58.38**	1.22	
	密度	0.91	55.41**	
	播期×密度	0.12	3.61	

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.5 结构性碳水化合物与 K 素含量

由表 5 可以看出,播种期对纤维素、木质素、K 素含量有着极显著差异,与正常播期处理相比,晚播处理下的纤维素、木质素、K 素含量显著增加。密度对半纤维素、纤维素、N 素含量、K 素含量有显著差异,随着密度的增加,半纤维素、纤维素、N 素含量整体呈现上升趋势,K 素含量随着密度的增加而下降。

表 5 种植密度对小麦基部二节间结构性碳水化合物与 N、K 素含量的影响

播期	密度	半纤维素/%	纤维素/%	木质素/%	N 素含量/%	K 素含量/%
NS	D1	27.8±1.52b	35.2±0.33c	7.87±0.15c	1.75±0.16b	2.06±0.16c
	D2	29.07±0.82ab	35.89±1.32bc	8.05±0.35c	2.36±0.03a	1.73±0.07cd
	D3	29.12±0.28ab	35.24±0.15c	8.23±0.34bc	2.36±0.02a	1.5±0.58d
LS	D1	27.81±1.12b	36.82±0.55b	8.66±0.62ab	1.60±0.09b	5.26±0.03a
	D2	29.29±0.85ab	38.77±0.78a	9.16±0.05a	2.40±0.04a	2.61±0.04b
	D3	29.5±0.37a	36.96±0.44b	8.74±0.18ab	2.61±0.13a	2.56±0.05b
F 值	播期	0.26	45.11**	27.37**	0.71	202.06**
	密度	5.60*	7.65**	1.71	80.16**	75.02**
	播期×密度	0.07	1.701	1.21	4.00	37.92**

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.6 力学性状与抗倒伏指数

由表 6 可以看出,播种期对小麦基部二节间针刺力无显著差异。种植密度对小麦基部二节间抗折力、针刺力有显著差异,随着密度的增加,抗折力、针刺力有下降的趋势。同一密度条件下,晚播处理下小麦植株抗倒伏指数较正常播期处理高;同一播期条件下,随着密度的增加,抗倒伏指数逐渐下降。

表 6 种植密度对小麦基部二节间力学性状与抗倒伏指数的影响

播期	密度	抗折力/N	针刺力/N	抗倒伏指数
NS	D1	14.14±1.36b	13.2±1.18ab	0.359
	D2	11.94±1.10c	10.47±1.92ab	0.297
	D3	9.62±1.38d	10.33±0.42b	0.238
LS	D1	16.17±1.53a	13.77±1.72a	0.451
	D2	12.60±0.91c	11.7±3.12ab	0.332
	D3	11.81±0.91c	10.9±1.67ab	0.310
F 值	播期	17.9322**	0.81	
	密度	45.87**	4.11*	
	播期×密度	1.6039	0.06	

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.7 解剖结构

由表 7 可以看出,播种期对大维管束个数、面积、薄壁组织厚度及其所占比例的影响达极显著,对小维管束个数、面积、机械组织厚度无显著影响。随着播期推迟,薄壁组织厚度及其所占比例逐渐增加,其他指标无明显规律性。种植密度对机械组织厚度的影响不显著,对维管束个数、面积,薄壁组织厚度,薄壁组织所占比例有极显著影响,在正常播期条件下薄壁组织所占比例随着密度的增加呈下降趋势,在晚播条件下,随着密度的增加表现为先上升后下降,其他指标在 2 种播期条件下随着密度变化并无明显规律性。

表 7 种植密度对小麦基部二节间解剖结构的影响

播期	密度	维管束个数		维管束面积/ μm^2		机械组织 厚度/ μm	薄壁组织 厚度/ μm	薄壁组织 所占比例/%
		大维管束	小维管束	大维管束	小维管束			
NS	D1	29.00±2.06d	17.78±2.49c	315655d	35937b	170.9±33.8b	1504d	88.97±8.54bc
	D2	37.33±1.58a	22.56±1.59a	411167bc	52026a	208.1±33.5a	1815c	88.91±5.7bc
	D3	35.55±1.33b	19.56±0.88b	328918d	50930a	179.9±23.8b	1213e	85.75±3.44c
LS	D1	35.55±0.88b	23.11±1.54a	430840ab	47101ab	210.1±26.9a	2732a	91.5±4.14ab
	D2	29.33±0.87d	17.78±0.83c	45569a	57354a	176.0±22.3b	2480b	92.74±3.55a
	D3	32.44±2.13c	16.56±0.53c	379678c	37202b	186.7±27.8b	1916c	90.38±5.8ab
F 值	播期	13.38**	3.86	41.36**	0.07	0.81	378.25**	13.28**
	密度	5.83**	13.21**	19.13**	5.94**	1.09	72.65**	2.78
	播期×密度	106.11**	56.40**	4.29**	5.15**	15.94**	16.68**	0.37

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

2.8 相关分析

由相关性分析(表 8)可以看出,小麦植株抗倒伏指数与基部二节间直径、干重、K 素含量、薄壁组织呈现显著正相关,与节间充实度呈正相关,而与 N 素含量呈显著负相关。表明小麦植株基部二节间干重与 K 素含量越高,茎秆抗倒指数越大。

3 讨论

随着小麦产量水平的提升,相对较大的群体越来越成为小麦高产的有力保障。如果在生产过程中,群体密度过大则会导致小麦茎秆发育质量差,抗折力弱,增加倒伏风险^[21],因此适当的播期和播种密度有利于小麦产量形成。在一定播期范围内适当加大播种量可以增加产量^[22]。王丽娜等^[23]研究表明,周麦 32 号春季起身拔节早,在晚播条件下,穗粒数影响最终产量,随着密度的增加,在产量上基本没有大的差别。而小麦品种华成 3366 春生分蘖多,起身拔节晚^[24],本研究中晚播处理小麦穗数、穗粒数比正常播期低,不同密度处理间比较,随着密度的增加,穗数逐渐上升,可见播种量增加引起的小麦产量增加主要是有效穗数增加造成的。

倒伏分为根倒伏和茎倒伏,生产实践中,茎倒伏最为普遍,多发生在茎秆基部节间。多数研究显示,植株高和

重心高较低有利于小麦抗倒伏^[25,26],基部节间直径、壁厚都对抗倒伏有显著影响。邵庆勤等^[27]研究表明,节间直径、节间壁厚随密度的增加而下降。本研究表明,密度对节间壁厚无显著差异,茎粗系数随密度的增大

表 8 小麦植株基部二节间特性与抗倒伏能力的相关性分析

指标	抗倒伏指数
抗折力	0.9881**
针刺力	0.9193**
节间长	0.0503
节间直径	0.7661*
节间壁厚	-0.3591
节间干重	0.8192*
节间充实度	0.7391
半纤维素含量	-0.7389
纤维素含量	0.2753
木质素含量	0.2175
N 素含量	-0.7834*
K 素含量	0.8965**
大维管束个数	-0.1462
小维管束个数	0.346
大维管束面积	0.1535
小维管束面积	-0.2025
机械组织	0.3792
薄壁组织	0.7594*
薄壁组织占比	-0.7167

注:同列内数据后不同小写字母表示差异 5%显著水平,*、** 分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。

而减少;相对于正常播期和晚播,晚播则降低了植株的株高、重心高,增加了茎粗系数和节间充实度以及抗倒伏指数。魏凤珍等^[28]研究表明,基部节间直径、壁厚、充实度与茎秆抗倒伏指数呈正显著相关。本研究表明,抗倒伏指数与小麦节间直径与节间干重呈显著正相关,与节间壁厚、节间充实度无显著相关性,增加小麦节间直径和节间干重可以加强小麦的抗倒伏。

研究表明,抗倒伏性能好的小麦品种根系发达,合理的氮素、钾素吸收有利于根系的生长,增强小麦抗倒伏^[29,30]。本研究表明,K素含量与抗倒伏指数呈极显著相关,说明K素含量越高,抗倒伏指数越高,但N素含量与抗倒伏指数呈显著负相关。纤维素、半纤维素、木质素是小麦茎秆细胞壁的重要组成成分,对维持抗折力方面有着重要的作用。彭佃亮等^[31]研究表明,抗倒性能好的品种木质素含量就高,木质素含量与抗倒伏指数呈显著正相关。本研究表明,木质素含量与抗倒伏指数无显著相关性,与前人研究不同。相同播期下随密度的上升,半纤维素、纤维素、N素含量也随之增加,K素含量则降低,晚播条件下的纤维素、木质素、K素含量比正常播期要高,因此通过晚播可以提高K素含量,结合适当的种植密度改善小麦倒伏。

有研究表明,小麦品种周麦18随着茎秆维管束数目的增多、维管束面积以及机械组织厚度的增大,抗倒伏能力显著提高^[32]。但有研究表明,扬麦系列小麦品种小维管束的数目在倒伏类型间无明显规律,对小麦抗倒性无显著影响^[33]。本研究表明,沿淮地区小麦植株抗倒伏指数与维管束数目、维管束面积以及机械组织无显著相关性,与薄壁组织呈显著正相关,说明在本试验中小麦茎秆薄壁组织厚度及其所占比例与茎秆抗倒能力有着密切的关系。以上结果的差异可能是由选用品种不同造成的。

综上所述,本试验条件下小麦可以通过提高基部节间干重、节间直径,增加基部节间K素含量、薄壁组织占比,降低基部节间N素含量来增强植株抗倒性能。

参 考 文 献

- [1] 刘慧婷,李瑞奇,王红光,等.密度和施氮量对强筋小麦藁优2018产量和抗倒性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(12):1619-1626.
- [2] 陈金华,余卫国,刘瑞娜,等.日尺度标准化前期降水蒸散指数及其在安徽省的适用性分析[J].中国生态农业学报,2019,27(6):919-928.
- [3] 陈磊.安徽省小麦干热风、高温逼熟、贪青晚熟、雪灾、倒伏灾害的防御[J].农业灾害研究,2014,4(10):53-57.
- [4] Paff K, Asseng S. Comparing the effects of growing conditions on simulated Ethiopian tef and wheat yields[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019(266/267):208-220.
- [5] 张敏,王岩岩,蔡瑞国,等.播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J].麦类作物学报,2013,33(2):325-330.
- [6] SI T, WANG X, HUANG M, et al. Double benefits of mechanical wounding in enhancing chilling tolerance and lodging resistance in wheat plants[J]. Plant Biology, 2019, 21(5):813-824.
- [7] CHEN X, WANG J, WANG Z, et al. Optimized nitrogen fertilizer application mode increased culms lignin accumulation and lodging resistance in culms of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2018, 228:31-38.
- [8] 卢昆丽,尹燕枰,王振林,等.施氮期对小麦茎秆木质素合成的影响及其抗倒伏生理机制[J].作物学报,2014,40(9):1686-1694.
- [9] 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):1343-1348.
- [10] 陈晓光,史春余,尹燕枰,等.小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系[J].作物学报,2011,37(9):1616-1622.
- [11] 王丹,丁位华,冯素伟,等.不同小麦品种茎秆特性及其与抗倒性的关系[J].应用生态学报,2016,27(5):1496-1502.
- [12] BERRY P M, SPINK J, STERLING M, et al. Methods for Rapidly Measuring the Lodging Resistance of Wheat Cultivars[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2003, 189(6):50-58.
- [13] 郭建文,田新会,张舒芸,等.不同浓度矮壮素对黑麦抗倒伏性和种子产量的影响[J].草业科学,2018,35(5):1128-1137.
- [14] 邵庆勤,周琴,王笑,等.不同小麦品种茎秆形态特征和解剖结构对多效唑的响应差异[J].麦类作物学报,2018,38(8):995-1003.
- [15] 武贵平.小麦倒伏原因分析与解决措施[J].农业科技通讯,2018(1):162-165.
- [16] 李东升,戎全虎,温明星,等.江苏淮南麦区主栽小麦品种耐迟播特性研究[J].麦类作物学报,2013,33(5):996-1000.
- [17] 卞爱群,吴建中,何宜玲,等.播期与密度对小麦茎秆抗倒力的影响研究[J].安徽农学通报(上半月刊),2010,16(9):69-70+134.
- [18] VANSOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10):3583-3597.
- [19] 吴建之,葛滢,王晓月.过硫酸钾氧化吸光度法测定植物总氮[J].理化检验(化学分册),2000(4):166-167.
- [20] KAACK K, SCHWARZ K U, BRANDER P E. Variation in morphology, anatomy and chemistry of stems of Miscanthus genotypes differing in mechanical properties[J]. Industrial Crops & Products, 2003, 17(2):131-142.

- [13] JIA Y H, SHAO M A, JIA X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 495(15): 150-161.
- [14] YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [15] 蔡进军, 张源润, 潘占兵, 等. 宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤水分的时空变异特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 75-79.
- [16] 车宗玺, 李进军, 汪有奎, 等. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 105-111.
- [17] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 993-1000.
- [18] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 57-63.
- [19] 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2009, 39(9): 1297-1303.
- [20] 刘晓丽, 汪有科, 马理辉, 等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 90-97.
- [21] 盛丰, 方妍, 张仁铎. 运用染色示踪方法研究土壤质地对土壤水非均匀流动特征的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 25-30.
- [22] 曹扬, 赵忠, 渠美, 等. 刺槐根系对深层土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 765-768.
- [23] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 113-119.
- [24] ROSENBAUM U, BOGENA H R, HERBST M, et al. Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(10): 3472-3476.
- [25] LI T C, SHAO M A, JIA Y H, et al. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 171: 460-468.
- [26] 曾泽群, 雷泽勇, 魏晓婷. 基于水分变化的沙地樟子松人工林土壤分层特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(12): 161-165.
- [27] 徐志尧, 张钦弟, 杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(3): 145-151.
- [28] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2018, 48(4): 457-466.
- [29] 唐敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 765-774.

(上接第 94 页)

- [21] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(4): 629-638.
- [22] 史晓芳, 仇松英, 史忠良, 等. 播期和播量对冬小麦尧麦 16 群体性状和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(3): 357-365.
- [23] 王丽娜, 韩玉林, 邹少奎, 等. 密度和播期对冬小麦新品种周麦 32 号产量构成和品质性状的影响[J]. *中国种业*, 2019(11): 56-59.
- [24] 乔玉强, 刘良柏, 王平信, 等. 小麦新品种华成 3366 绿色增产技术研究[J]. *现代农业科技*, 2017(23): 11-12.
- [25] 梁玉超, 张永强, 石书兵, 等. 施氮量对滴灌冬小麦茎部特征及其抗倒伏性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1467-1472.
- [26] 朱新开, 王祥菊, 郭凯泉, 等. 小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006(1): 87-92.
- [27] 邵庆勤, 周琴, 王笑, 等. 种植密度对不同小麦品种茎秆形态特征、化学成分及抗倒性能的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(5): 808-816.
- [28] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 等. 氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能的影响[J]. *作物学报*, 2008(6): 1080-1085.
- [29] 刘颖, 伊森, 王建国, 等. 氮、钙配施对花生根系生长及氮肥利用的影响[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(4): 98-104.
- [30] 常海娜, 周静, 宋娇敏, 等. 不同供钾水平对大白菜幼苗生长和根系形态的影响[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2015, 28(3): 56-59.
- [31] 彭佃亮. 小麦倒伏与茎秆木质素代谢的关系及其对籽粒产量和淀粉特征的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [32] 孟令志, 买春艳, 于立强, 等. 黄淮冬麦区部分小麦品种(系)抗倒伏相关性状分析[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(7): 888-895.
- [33] 张明伟. 扬麦系列品种抗倒特性与氮素调控效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.