

李海康, 丁启朔, 孙克润, 等. 稻茬小麦单粒精播的幼苗密度效应[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1316-1322.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.007

稻茬小麦单粒精播的幼苗密度效应

李海康¹, 丁启朔¹, 孙克润², 何瑞银¹, 汪小昂¹, 厉翔¹, 刘富奎¹

(1.南京农业大学工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031; 2.江苏银华春翔机械制造有限公司, 江苏连云港 222200)

摘要: 为了在大田条件下研究种植密度对稻茬小麦幼苗生长状况的影响, 选用冬小麦品种宁麦 13 为研究材料, 分别于 2017 年和 2018 年采用免耕单粒精密条播方式控制稻茬小麦种植密度, 设种子间距分别为 1.5 cm、3.0 cm 和 4.5 cm 3 个处理, 行距均为 20 cm。通过定位跟踪统计稻茬小麦出苗率和苗龄占比, 同时测定分析稻茬麦幼苗个体地上部和根系指标, 分别用出苗动态和单株农艺性状 2 类指标进行评价。结果表明, 对于南方水稻土而言, 稻茬小麦出苗率随着种植密度的增大而减小, 但差异未达到显著水平。出苗率和苗龄占比可以用于检测不同种植密度处理之间的出苗差异。随种植密度的增加, 单株稻茬小麦幼苗地上部干质量和根系干质量在 2017 年呈减小趋势; 2018 年稻茬小麦幼苗农艺性状随密度的增加而受到抑制。相比于出苗率指标, 苗龄占比更能准确反映稻茬小麦的出苗密度效应。稻茬小麦群体从出苗期开始出现株间竞争, 而且种植密度越大, 株间竞争越剧烈。

关键词: 稻茬小麦; 种植密度; 出苗率; 密度效应; 株间竞争

中图分类号: S512.1⁺10.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1316-07

Seedling density effects of post-paddy wheat under precision seeding

LI Hai-kang¹, DING Qi-shuo¹, SUN Ke-run², HE Rui-yin¹, WANG Xiao-chan¹, LI Xiang¹, LIU Fu-xi¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China; 2. Jiangsu Yinhua Chunxiang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Lianyungang 222200, China)

Abstract: To study the effects of planting density on the growth of post-paddy wheat under field conditions, Ningmai 13 was precisely sown in a single-seeded manner with seed-to-seed distance of 1.5 cm, 3.0 cm and 4.5 cm, and line spacing was 20 cm in 2017 and 2018. Seedling emergence rate and seedling age ratio of post-paddy wheat were obtained through location and tracking. At the same time, the individual shoot and root indices of post-paddy wheat seedlings were measured and analyzed, and the seedling emergence dynamics and agronomic traits of individual plant were used for evaluation. The results showed that for southern paddy soil, seedling emergence rate reduced with the increase of planting density, but the difference did not reach a significant level. Seedling emergence rate and seedling age ratio the difference of seedling emergence among different planting density treatments for post-paddy wheat. The shoot and root dry weight of single post-paddy wheat seedling decreased with the increase of density in 2017. The agronomic characters of post-paddy wheat seedlings were inhibited with the increase of planting density in 2018. Compared with seedling emergence rate, seedling age ratio was more precise in quantifying density effects. The competition among plants began from the emergence stage. With the increase of planting density, the plant-to-plant competition becomes more

and more intense.

Key words: post-paddy wheat; planting density; seedling emergence rate; density effect; plant-to-plant competition

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)1002]; 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300900); 江苏省苏北科技专项(ZL-LYG2017008)

作者简介: 李海康(1993-), 男, 山西吕梁人, 硕士, 主要从事农情信息研究。(E-mail)lhkang1993@126.com

通讯作者: 丁启朔, (E-mail)qsding@njau.edu.cn

高质量的作物群体是实现高产的重要保障, 创建合理的作物群体需要适宜的种植密度及种植方

式。已有研究表明,合理的播种密度可以创建合理的作物群体,培育健壮的个体,增加个体干物质积累并最终获得高产^[1-5]。在种植方式方面,近年来以花生、玉米为主要研究对象多地开展了单粒精播技术的研究^[6],研究表明,单粒精播不仅显著节约用种量,而且可通过合理的群体构建提高作物产量。对于密植作物小麦而言,也有学者研究发现,单粒精密播种可以成为未来调控小麦群体质量、提高产量的重要途径之一^[7]。

目前小麦单粒精播研究主要侧重于精密播种机械的研发及关键工作部件设计^[8-10],对精密播种后的小麦生长状况鲜有报道。稻茬小麦主要分布于长江流域^[11],但因诸多耕作栽培障碍因子(如水稻土黏重湿烂、耕作困难、秸秆量大等)而导致播种质量差等问题^[12],近年来各地陆续开展的稻茬小麦免耕种植技术及麦田杂草防除技术取得了显著的增产增收效果^[9,13]。因此,需要进一步探究免耕种植模式下单粒精播技术对稻茬小麦生长状况的影响。

种植密度影响作物群体结构,对小麦群体质量及产量起决定性作用^[14]。种植密度也影响到作物的出苗期幼苗生长^[15]。过高的种植密度会导致株间竞争加剧^[16]。合理的种植密度则可以保障群体中水肥光热资源的合理分配及高产^[17]。针对小麦的研究多集中于探讨密度对小麦的茎蘖动态、干物质积累以及产量和产量组成的影响^[18-19],较少涉及小麦出苗期的幼苗生长状况和株间效应等方面的研究。

常规的田间试验方法多使用机械条播,鲜见小麦免耕单粒精密种植方式下的出苗效应报道。常规机械条播属于无序播种方式,群体内植株个体的相对空间位置随机分布。而定量株间效应的首要条件是植株个体间相对准确的空间距离调控。机械条播可能导致株距过小、株间竞争剧烈,最终影响群体生产力^[20]。

本研究使用新型单粒精密播种方法进行免耕条件下的稻茬小麦单粒精播,实现群体中个体数量定量化,通过改变稻茬小麦种子粒距调控群体密度,同时通过定位跟踪对稻茬小麦出苗率和苗龄占比等指标进行动态统计,以期揭示免耕稻茬小麦单粒精播技术模式下的幼苗密度效应。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于江苏省南京市六合区八百桥试验田

(118°59'E, 31°98'N)进行,土壤类型为黄棕壤质,土壤性质是长期稻麦轮作而形成的水稻土,具有高黏性、高含水率的特征。该区常年采用旋耕机浅旋作业,旋耕深度在10~12 cm,致使耕层浅薄,犁底层坚硬。土壤耕层0~20 cm 有机质 22.73 g/kg,全氮 1.29 g/kg,全磷 0.58 g/kg,全钾 11.53 g/kg,碱解氮 99.96 mg/kg,速效磷 8.79 mg/kg,速效钾 139.33 mg/kg, pH 值 7.6,前茬作物为水稻。气候为亚热带季风气候,年均温度 15.1 ℃,年均降水量 1 000 mm 左右,光照充足。地形为丘陵耕地,地势平坦,平均海拔高度 20 m。该地区 2017 年 11 月、12 月和 2018 年 11 月、12 月日平均温度和降雨量见图 1。

试验前进行人工地表清茬^[11]。播前施磷酸二铵 375 kg/hm²,尿素 90 kg/hm²,氯化钾 375 kg/hm²,播前在所有小区使用除草剂,以控制杂草。小麦品种为宁麦 13,播种时间分别为 2017 年 11 月 6 日和 2018 年 11 月 8 日。播种方式为免耕单粒精密条播,等行距种植,行距 20 cm。在适宜密度范围内,设置 3 个单粒精播处理,种子粒距分别为 1.5 cm、3.0 cm 和 4.5 cm,分别记为 T1.5、T3.0 和 T4.5,3 次重复,随机区组排列。小区面积 3 m×5 m,共 9 个小区。小区间开排水沟,以保证试验地块不积水。条播播种试验采用人工开沟的方式,人工沿行向开出宽 5~6 cm、深 3~5 cm 的播种沟^[12]。

稻茬小麦等距离人工点播采用本实验室自主设计的等孔距栅条精播板^[21],孔径为 5 mm。播种时将盛有种子的栅条板置于播种沟的正上方,双手匀速翻转 180°,使种子均匀落入播种沟中,人工覆土镇压。小麦田间管理按照高产大田栽培规程,不灌溉。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 出苗动态指标 分别对稻茬小麦出苗率和苗龄占比进行跟踪统计。每种处理沿行向取长度为 0.9 m 的稻茬小麦群体,以 50% 以上小麦的第 1 真叶露出地表 2 cm 时为出苗标准,分别在出苗后的第 4 d、7 d、10 d、13 d、20 d^[22]进行统计,5 次重复。计算出苗率(SER)和苗龄占比(SAR_i): $SER = (n/N) \times 100\%$,式中 n 表示出苗数, N 表示播种数; $SAR_i = (n_i/N) \times 100\%$,式中 n_i 表示某个苗龄的幼苗数量, N 表示播种数, i 为 1~5 分别表示一叶、一叶一心、二叶、二叶一心、三叶。

1.2.2 稻茬小麦群体的幼苗生长指标 测定田间状态稻茬小麦幼苗期群体的株间效应尚无可借鉴的

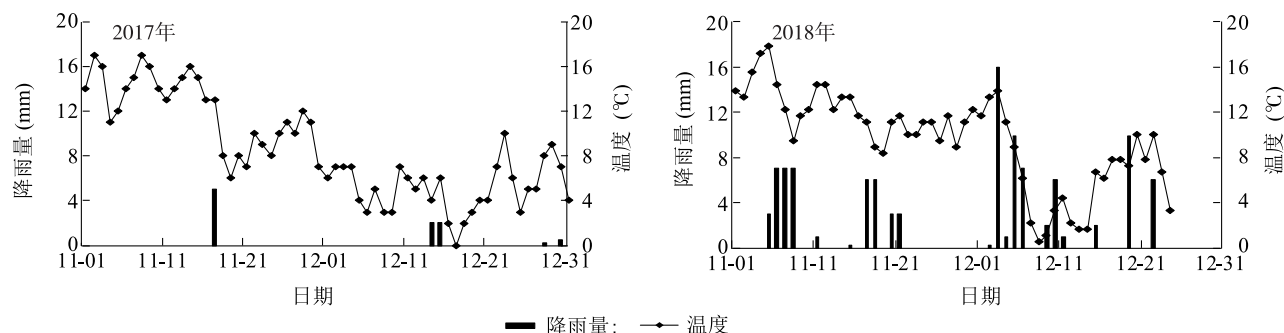


图1 2017年11月、12月和2018年度11月、12月试验田日平均温度和降雨量

Fig.1 Daily average temperature and rainfall of the test field in November, December 2017 and November, December 2018

方法,本研究参考生态学中株间效应的研究方法,在稻茬小麦出苗期使用矩形取样筒(400 mm×200 mm×250 mm)进行无损取样^[23]。田间取样分别于2017年12月14日和2018年12月17日进行,选取地上部长势相近的植株,沿行向将取样筒中心置于所取群体区段的对中位置,然后用手锤均匀用力将样筒打入土层,使样筒全部打入土壤后将取样筒连同植株和土壤一同取出带回实验室。测定时先将植株的地上部剪下,将茎叶自然平展置于书页中压平,压好后放入扫描仪扫描成像,使用图像处理软件Image Pro-Plus测定单株叶面积。扫描完后将植株在105℃杀青30 min,并于85℃下烘干至恒质量,称取单株干质量。根构型测定采用陈信信等^[24]的方法。使用专用根系构型数字化仪测量各处理的根系3D拓扑数据^[23],并导入Pro-E模拟重构,获取3D拓扑的定量模型。测定稻茬小麦单株根长、根量和扎根深度(初生根)。最后将各单株根系烘干称质量,计算根冠比(根系与地上部干质量之比)。

1.3 数据处理

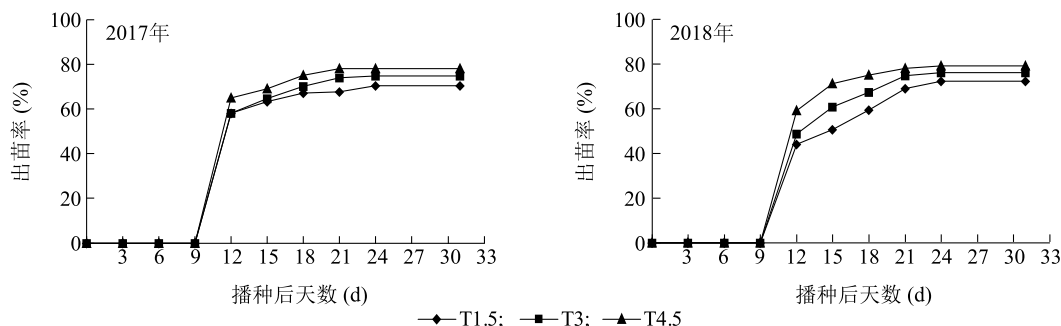
采用Excel 2010和SPSS 19.0软件对试验数据

进行统计分析。使用单因素(one-way ANOVA)和Duncan's法进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 稻茬小麦不同种植密度出苗动态

图2显示不同年度、不同播种密度的稻茬小麦群体出苗动态均符合经典的S函数出苗模型。对于南方水稻土而言,随着稻茬小麦种子粒距的增大,种植密度逐渐减小,其出苗率呈逐渐增加的趋势,然而各处理间出苗率差异未达到显著水平。对稻茬小麦各年度不同种植密度出苗时间进行比较(表1),发现2017年T1.5和T3.0处理稻茬小麦播种至出苗率达到50%所用时间均为11.6 d,T4.5比其他处理短0.3 d。T4.5处理稻茬小麦从播种到出苗结束所用时间最短,为21 d。此外2018年不同处理从播种到出苗率达到50%所用时间中,T1.5处理最长,达到14.7 d。各处理从播种到出苗结束时间一致均为24 d。表明稻茬小麦出苗动态随年度变化而产生差异。这可能与各年度稻茬小麦出苗期所处的气候环境和土壤状态有关^[25]。



T1.5处理:种子间距为1.5 cm;T3.0处理:种子间距为3.0 cm;T4.5处理:种子间距为4.5 cm。

图2 2017年和2018年稻茬小麦不同种植密度出苗动态

Fig.2 Emergence dynamics of post-paddy wheat under different planting densities in 2017 and 2018

表 1 播种密度对稻茬小麦出苗时间的影响
Table 1 Effects of planting density on emergence time of post-paddy wheat

年度	处理	播种至开始 出苗的时间 (d)	播种至 50% 出苗的时间 (d)	播种至 出苗结束的 时间(d)
2017	T1.5	9	11.6	24
	T3.0	9	11.6	24
	T4.5	9	11.3	21
2018	T1.5	9	14.7	24
	T3.0	9	12.3	24
	T4.5	9	11.5	24

各处理见图 2 注。

2.2 种植密度对稻茬小麦苗龄占比的影响

虽然出苗率是反映出苗期作物生长的重要指标,但其仅能反映作物群体宏观的出苗情况,无法反映作物出苗期群体内的个体生长信息。6 次出苗率和苗龄占比统计结果(表 2 和表 3)显示,随着种植密度的增加,2017 年稻茬小麦出苗率呈降低的趋

势,但出苗率差异均未达到显著水平。然而苗龄占比动态表明,播后 12 d 不同处理稻茬小麦幼苗均为一片叶。播后 15 d,T3.0 和 T4.5 处理出现一叶一心幼苗,占比分别为 17.34% 和 27.00%,T1.5 处理无一叶一心幼苗。随着种子粒距的增大,种植密度相应减小,一叶幼苗占比逐渐减少,一叶一心幼苗占比逐渐增加,且 T1.5 处理和 T4.5 处理一叶一心幼苗占比差异达到显著水平。播后 18 d,3 种密度处理均出现二叶幼苗,而且随着种植密度的增加,二叶幼苗占比呈降低趋势。T1.5 处理二叶幼苗占比最大,与其余 2 种处理相比差异显著。播后 21 d,T3.0、T4.5 处理出现二叶一心幼苗,占比一致均为 2%,而 T1.5 处理未出现二叶一心幼苗。播后 21 d 到 24 d T1.5 处理开始出现二叶一心幼苗。播后 24 d 到 31 d,各处理均开始出现三叶幼苗。播后 31 d 三叶幼苗占比随种植密度的增加呈逐渐减小的趋势。T1.5 处理三叶幼苗占比与其他 2 种处理差异达到显著水平,T3.0、T4.5 处理之间差异不显著。

表 2 2017 年种植密度对稻茬小麦出苗率及苗龄占比动态的影响
Table 2 Effect of planting density on seedling emergence rate and seedling age ratio of post-paddy wheat in 2017

播种后天数 (d)	处理	出苗率 (%)	一叶幼苗 占比(%)	一叶一心幼苗 占比(%)	二叶幼苗 占比(%)	二叶一心幼苗 占比(%)	三叶幼苗 占比(%)
12	T1.5	58.00a	58.00a	0	0	0	0
	T3.0	58.00a	58.00a	0	0	0	0
	T4.5	65.00a	65.00a	0	0	0	0
15	T1.5	63.33a	63.33a	0b	0	0	0
	T3.0	64.67a	47.33ab	17.34ab	0	0	0
	T4.5	69.00a	42.00b	27.00a	0	0	0
18	T1.5	67.00a	30.00a	23.00a	14.00b	0	0
	T3.0	70.00a	14.00b	16.67a	39.33a	0	0
	T4.5	75.00a	11.00b	20.00a	44.00a	0	0
21	T1.5	67.67a	8.33a	22.34a	37.00b	0a	0
	T3.0	74.00a	6.67a	12.67b	52.67ab	2.00a	0
	T4.5	78.00a	4.00a	8.00b	64.00a	2.00a	0
24	T1.5	70.33a	3.00a	12.00a	50.00a	5.33a	0
	T3.0	74.67a	1.33ab	6.00b	43.33a	24.00a	0
	T4.5	78.00a	0b	3.00b	52.00a	23.00a	0
31	T1.5	70.33a	1.33a	7.33a	17.33a	40.67a	3.67b
	T3.0	74.67a	1.00a	3.67a	11.33a	26.67b	32.00a
	T4.5	78.00a	0a	2.00a	14.00a	26.00b	36.00a

各处理见图 2 注。同一列中同一统计时期不同字母表示不同种植密度间差异显著($P<0.05$)。

从表 3 可以看出,播后不同时期苗龄占比差异也达到显著水平。播后 21 d, T1.5 处理一叶、二叶和二叶一心幼苗苗龄占比与其他 2 种处理差异均达到显著水平,但其整体出苗率只与 T4.5 处理存在显著差异,其余时期均出现类似的情形。两种指标体

系的区别显示,常规出苗率统计方法可能无法精细表征不同处理之间的差异,而苗龄占比动态指标则能够界定出处理间的显著差异,表明苗龄占比可以更准确地表征种植密度对稻茬小麦幼苗生长状况的影响。

表 3 2018 年种植密度对稻茬小麦的出苗率及苗龄占比动态的影响

Table 3 Effect of planting density on seedling emergence rate and seedling age ratio of post-paddy wheat in 2018

播种后天数 (d)	处理	出苗率 (%)	一叶幼苗 占比(%)	一叶一心幼苗 占比(%)	二叶幼苗 占比(%)	二叶一心幼苗 占比(%)	三叶幼苗 占比(%)
12	T1.5	44.00b	44.00b	0	0	0	0
	T3.0	48.67b	48.67b	0	0	0	0
	T4.5	59.00a	59.00a	0	0	0	0
15	T1.5	50.67c	47.67a	3.00c	0	0	0
	T3.0	60.67b	37.33b	23.33b	0	0	0
	T4.5	71.00a	34.00b	37.00a	0	0	0
18	T1.5	59.33c	20.00a	25.66a	13.67c	0	0
	T3.0	67.33b	12.00b	20.66a	34.67b	0	0
	T4.5	75.00a	9.00b	12.00b	54.00a	0	0
21	T1.5	69.00b	19.33a	8.00a	41.67b	0b	0
	T3.0	74.67ab	1.33b	8.67a	56.00a	8.67a	0
	T4.5	78.00a	2.00b	9.00a	56.00a	15.80a	0
24	T1.5	72.33b	7.00a	15.67a	43.67b	6.00c	0
	T3.0	76.00ab	1.33b	6.67b	55.33a	12.67b	0
	T4.5	79.00a	0b	4.00b	33.00c	42.00a	0
31	T1.5	72.33b	1.67a	7.67a	15.67a	41.33a	6.00b
	T3.0	76.00ab	0.67a	3.33b	11.33b	18.67b	42.00a
	T4.5	79.00a	0a	0c	11.00b	23.00b	45.00a

各处理见图 2 注。同一列中同一统计时期不同字母表示不同种植密度间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 种植密度对稻茬小麦幼苗植株生长的影响

植株个体茎叶及根系生长状况更能够表达群体的密度效应。表 4 表明,2017 年随着稻茬小麦种植密度的增加,小麦幼苗个体地上部干质量呈逐渐降低的趋势,其中 T1.5 处理地上部干质量和其他 2 种处理间差异达到显著水平,T3.0 和 T4.5 处理之间差异不显著。T1.5 处理稻茬小麦幼苗叶面积与 T3.0 和 T4.5 处理之间的差异均达到显著水平,T3.0 和 T4.5 处理之间差异不显著。2017 年不同处理间根系指标差异均不显著。2018 年不同处理稻茬小麦幼苗地上部和根系相关指标均随种植密度的增加呈逐渐降低的趋势,而且 T1.5 处理除根冠比与其余处理差异不显著外,其余指标均与其他 2 种处理差异显著。对比后发现不同年度稻茬小麦同时期幼苗生

长状况均不相同,表明稻茬小麦幼苗生长状况受年度影响较大。

分别对各年度每种处理地上部干质量和根系干质量进行数据拟合(图 3),发现稻茬小麦幼苗地上部和根系干质量与种子粒距均呈正相关关系,与种植密度均呈负相关关系。不同年度稻茬小麦幼苗地上部和根系干质量与种子粒距的拟合程度均不相同。其中 2017 年稻茬小麦种子粒距与地上部干质量的拟合方程为 $y = 4.714x + 26.095$, 决定系数 (R^2) 为 0.780; 种子粒距与根系干质量的拟合方程为 $y = 1.762x + 9.429$, R^2 高达 0.998。2018 年稻茬小麦种子粒距与地上部干质量的拟合方程为 $y = 7.611x + 18.277$, R^2 为 0.794; 种子粒距与根系干质量的拟合方程为 $y = 7.056x + 7.889$, R^2 为 0.906。表明相比于

地上部干质量,根系干质量与种子粒距的线性关系可以实现更优拟合。说明基于个体植株的地上、地下部器官层面的精细分析是稻茬小麦种植密度效应研究的关键。

表 4 种植密度对稻茬小麦幼苗地上部和根系生长的影响

Table 4 Effects of planting density on shoot and root growth of post-paddy wheat seedlings

年度	处理	单株地上部干质量 (mg)	单株叶面积 (mm ²)	单株根系干质量 (mg)	单株根数量	单株总根长 (mm)	扎根深度 (mm)	根冠比
2017	T1.5	31.000b	355.978b	12.000a	4.86a	492.264a	129.957a	0.403a
	T3.0	44.570a	651.903a	14.860a	5.29a	453.888a	105.597a	0.338a
	T4.5	45.140a	587.313a	17.290a	5.71a	619.605a	122.89a	0.395a
2018	T1.5	26.333b	420.526b	16.500b	4.83b	359.524b	79.788b	0.647a
	T3.0	47.833a	1 019.989a	33.000a	6.00b	752.375a	119.500a	0.712a
	T4.5	49.167a	1 087.173a	37.667a	7.50a	781.831a	119.500a	0.781a

各处处理见图 2 注。同一列中同一年份不同字母表示不同种植密度间差异显著 ($P<0.05$)。

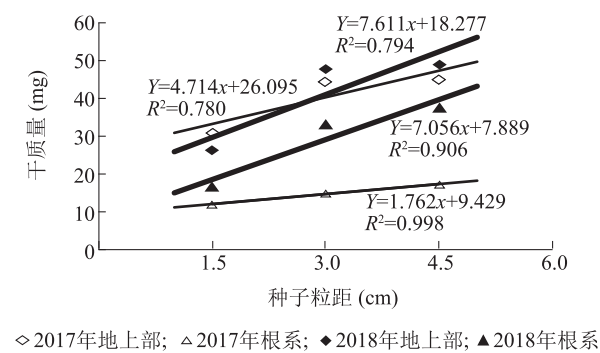


图 3 种子粒距与地上部干质量和根系干质量的线性拟合
Fig.3 Linear fitting of seed spacing with shoot dry weight and root dry weight

3 讨论

种植密度是影响作物早期生长的一个重要因素^[26]。但一直以来针对作物种植密度对幼苗生长状况的影响研究有所欠缺^[15]。Grundy 等^[26]指出婆婆纳的出苗率随密度增加而降低。Lati 等^[15]和 Houseman 等^[27]分别发现黑茄 (*Solanum nigrum* L.) 和截叶胡枝子 (*Lespedeza cuneata*) 在田间条件下也表现出类似的关系。本研究通过单粒精密播种发现稻茬小麦出苗密度效应与前人研究结果类似。稻茬小麦密度效应的准确定量离不开精细的测试方法和评价指标。Lati 等^[15]指出,种植密度对作物出苗和早期生长的影响可从植株叶片数量上表征。本研究将不同处理稻茬小麦幼苗苗龄占比进行统计发现,2017 年不同种植密度处理整体出苗率的 6 次统计结果均无显著差异,然而将出苗率细化到稻茬小麦幼苗苗龄占比时,除第 1 次统计外,其余时期不同处

理的差异均达到显著水平。2018 年也出现类似的结果。这表明在研究稻茬小麦出苗密度效应时,仅对整体出苗率进行统计分析难以准确反映出苗密度效应的差异。

种植密度决定群体中株间竞争强度,表现为作物地上和地下部的资源和空间竞争^[28]。种植密度的增加压缩了植株间的生态位,导致株间竞争的加剧和单株生长状况的恶化^[29]。地上部干质量是评价小麦生长发育的重要指标,也是小麦产量形成的物质基础^[30]。根系又是植物吸收水分和营养的重要器官,与地上部建成密切相关,良好的根系发育促进其地上部的生长^[31]。种内竞争的开始阶段被定义为在不同种植密度中可以检测到生物量存在显著差异的阶段^[32]。本研究结果表明,2017 年随着稻茬小麦种植密度逐渐增加,单株地上部干质量、根系干质量和根量均呈逐渐减小的趋势。T1.5 处理和其余 2 种处理在地上部干质量指标上差异达到显著水平,2018 年稻茬小麦幼苗生长状况除根冠比外均出现类似情形。表明稻茬小麦在出苗期开始出现株间竞争,而且种植密度越大,稻茬小麦群体中个体的生长越受阻碍。对比 2 个年度种植密度对稻茬小麦出苗率、苗龄占比和幼苗生长状况的影响发现,2 年中同一种种植密度下稻茬小麦最终出苗率基本一致,而出苗动态和苗龄占比以及幼苗农艺性状有所不同,这可能是由于这 2 年稻茬小麦出苗期田间平均气温和降雨量的差异造成的。表明稻茬小麦生长状况受年度影响较大,气候可能是其中一个重要因素。

参考文献:

[1] 梁晓艳,郭 峰,张佳蕾,等.单粒精播对花生冠层微环境、光合

- 特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3700-3706.
- [2] 李桂芬, 覃斯华, 陆宇明, 等. 不同栽培密度和整枝措施对大棚小型无籽西瓜综合效益的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(12): 2506-2510.
- [3] 李拴良, 任长宏, 格桑曲珍, 等. 宽幅硬茬播种对冬小麦生长、产量及品质的效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 75-80.
- [4] 母养秀, 张久盘, 穆兰海, 等. 不同播种密度对荞麦植株叶片衰老及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 40-42.
- [5] 李金才, 尹 钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(5): 662-666.
- [6] 史红志, 党 伟, 王德民. 夏玉米机械化单粒精播技术[J]. 农业科技通讯, 2014(1): 187-188.
- [7] 周忠军, 董全才, 郭延敏, 等. 小麦精播“三高”栽培技术的实践与应用[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 175-178.
- [8] 彭强吉, 荐世春, 何青海, 等. 小麦单粒精密播种机的研制[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 71-75.
- [9] 郭爱兵, 路志国, 郭鹏飞, 等. 我国小麦精播技术研究现状及发展趋势[J]. 现代农业科技, 2015(6): 75-76.
- [10] 林海波, 董树亮, 张 颖, 等. 基于 CompactRIO 的小麦精播机器人控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 99-105.
- [11] 李朝苏, 汤永禄, 吴 春, 等. 播种方式对稻茬小麦生长发育及产量建成的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 36-43.
- [12] 李朝苏, 汤永禄, 解立胜, 等. 2BMFDC-6 型稻茬麦半旋播种机设计与性能试验[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2): 789-793.
- [13] 刘永忠, 肖慰祖, 吴佳文, 等. 氟噻草胺与氟唑磺隆、双氟磺草胺桶混施用对小麦田杂草防效及对小麦的安全性[J]. 杂草学报, 2017, 35(4): 40-45.
- [14] 王树丽, 贺明荣, 代兴龙, 等. 种植密度对冬小麦根系时空分布和氮素利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1839-1845.
- [15] LATI R N, FILIN S, EIZENBERG H. Black nightshade (*Solanum nigrum*) emergence and development is affected by seed density and burial depth[J]. *Phytoparasitica*, 2012, 40(2): 195-203.
- [16] TOKATLIDIS I S. Addressing the yield by density interaction is a prerequisite to bridge the yield gap of rain-fed wheat[J]. *Annals of Applied Biology*, 2014, 165(1): 27-42.
- [17] 李潮海, 苏新宏, 谢瑞芝, 等. 超高产栽培条件下夏玉米产量与气候生态条件关系研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 311-316.
- [18] HILTBRUNNER J, STREIT B, LIEDEGENS M. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? [J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(3): 163-171.
- [19] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 等. 钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 743-757.
- [20] WANG F H, WANG X Q, SAYRE K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China[J]. *Field Crops Research*, 2004, 87(1): 35-42.
- [21] 芮超杰. 稻茬麦免耕种植技术模式及其效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [22] CHEN Y, TESSIER S, IRVINE B. Drill and crop performances as affected by different drill configurations for no-till seeding[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(2): 147-155.
- [23] 陈信信, 丁启朔, 李毅念, 等. 稻茬麦根系构型的定向分型分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1711-1717.
- [24] 陈信信, 丁启朔, 丁为民, 等. 基于虚拟植物技术的冬小麦根系3D构型测试与分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1481-1488.
- [25] NASR H M, SELLES F. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed[J]. *Soil & Tillage Research*, 1995, 34(1): 61-76.
- [26] GRUNDY A C, MEAD A, BURSTON S. Modelling the emergence response of weed seeds to burial depth: interactions with seed density, weight and shape[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(4): 757-770.
- [27] HOUSEMAN G R, MAHONEY A K. Intraspecific seed interactions alter seedling emergence of *Lespedeza cuneata* under field conditions[J]. *Population Ecology*, 2015, 57(3): 539-544.
- [28] 田红琳, 隗 溟. 密度、邻体和综合效应对水稻总叶数影响的研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(5): 139-142.
- [29] PAGE N, ERIC R. Timing, effect and recovery from intraspecific competition in maize[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(102): 1007-1013.
- [30] 胡焕焕, 刘丽平, 李瑞奇, 等. 播种期和密度对冬小麦品种河农822产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(3): 490-495.
- [31] 孙三杰, 李建明, 宗建伟, 等. 亚低温与干旱胁迫对番茄幼苗根系形态及叶片结构的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3027-3032.
- [32] PAGANO E, MADDONNI G A. Intra-specific competition in maize: Early established hierarchies differ in plant growth and biomass partitioning to the ear around silking[J]. *Field Crops Research*, 2007, 101(3): 306-320.

(责任编辑: 张震林)