麦类作物学报 2020,40(7):850－856
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2020.07.10

网络出版时间:2020-07-02
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20200703.0941.004.html

宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响

孔令英[1],赵俊晔[2],于振文[1],石 玉[1]

(1.山东农业大学农业部作物生理生态与耕作重点实验室,山东泰安 271018;2.中国农业科学院农业信息研究所,北京 100081)

摘 要:为探讨宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响,以小麦品种济麦22为试验材料,在大田试验条件下设置90×10^4株·hm^{-2}(D1)、180×10^4株·hm^{-2}(D2)、270×10^4株·hm^{-2}(D3)、360×10^4株·hm^{-2}(D4)4个种植密度处理,分析了不同种植密度下麦田0～100 cm土层土壤相对含水量、小麦群体动态、叶面积指数、冠层光截获特性、光能利用率、阶段干物质积累量、籽粒产量及水分利用效率的特点。结果表明,D2处理的麦田0～100 cm土层土壤相对含水量在返青期显著高于D3、D4处理,与D1处理无显著差异;在拔节期、开花期、成熟期D2处理显著高于D1、D4处理,与D3处理差异不显著。群体总茎数在越冬期、返青期、拔节期均随种植密度的增加而增加,且不同处理之间差异显著,在开花期、成熟期D4处理显著高于其他处理,D3、D2处理差异不显著,但显著高于D1处理;分蘖成穗率在D2处理下达到最大值,为52.51%;D2处理的叶面积指数在开花后0 d、开花后7 d、开花后14 d显著高于其他处理;开花后7 d,D2处理的冠层光合有效辐射截获量、截获率、光能利用率均显著高于D1、D3、D4处理,冠层光合有效辐射透射率表现为D3、D2处理差异不显著,但显著低于D4处理和D1处理。D2处理的拔节至开花阶段、开花至成熟阶段干物质积累量显著高于其他处理,单位面积穗数随种植密度的增加而增加,但D2、D3处理差异不显著;穗粒数、千粒重随种植密度的增加而降低,D1、D2处理差异不显著,但显著高于D3、D4处理;籽粒产量及水分利用效率均在D2处理下达到最大值,分别为9 158.71 kg·hm^{-2}、17.21 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。这说明在本试验条件下,180×10^4株·hm^{-2}为构建宽幅播种小麦合理群体结构、提高群体光能利用率、籽粒产量及水分利用效率的最优种植密度。

关键词:种植密度;土壤相对含水量;群体结构;冠层光截获;水分利用效率;干物质积累量;籽粒产量

中图分类号:S512.1;S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2020)07-0850-07

Effect of Planting Density on Population Structure and Light Use Efficiency of Wheat under Wide-Width Sowing Conditions

KONG Lingying[1], ZHAO Junye[2], YU Zhenwen[1], SHI Yu[1]

(1. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology and Farming System, Shandong Agricultural University, Taïan, Shandong 271018, China; 2. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the effects of different planting densities on wheat population structure and light use efficiency under the condition of wide-width sowing, Jimai 22 was used as experimental material and four planting density levels: 90×10^4 plants·hm^{-2}(D1), 180×10^4 plants·hm^{-2}(D2), 270×10^4 plants·hm^{-2}(D3) and 360×10^4 plants·hm^{-2}(D4) were set up under field conditions. The differences of soil relative water content, wheat population dynamics, leaf area index, canopy light interception characteristics, light use efficiency, dry matter accumulation, grain yield and water use ef-

收稿日期:2019-10-24 修回日期:2019-12-18
基金项目:国家自然科学基金项目(31771715, 31601243);农业部现代小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-19)
第一作者 E-mail:klyxiaomai@163.com
通讯作者:赵俊晔(E-mail:zhaojunye@caas.cn)

ficiency were compared and analyzed under different planting densities. The results showed that the soil relative water content of 0－100 cm soil layer under D2 treatment was significantly higher than that under D3 and D4 treatments at the revival stage, but it was not significantly different from that under D1 treatment. The soil relative water content of 0－100 cm soil layer under D2 treatment was significantly higher than that of D1 and D4 at jointing stage, anthesis stage and maturity stage, but it was not significantly different from that under D3 treatment. The total number of stems in the population increased with the increase of planting density in wintering, re-greening and jointing stages, and there were significant differences among the treatments. The total number of stem under D4 treatment was significantly higher than that under other treatments at flowering and maturity stages, and there was not significant difference between D3 and D2 treatment, which was significantly higher than that under D1 treatment, and the tillering rate reached to a maximum of 52.51% under D2 treatment. The leaf area index of D2 treatment was significantly higher than that of other treatments at 0, 7 and 14 days after flowering. At 7 days after flowering, the PAR interception, interception rate and light use efficiency of D2 treatment were significantly higher than those under D1, D3 and D4 treatments. Photosynthetic active radiation rate was not significantly different between D3 and D2 treatments, which was significantly lower than those under D4 and D1 treatments. The dry matter accumulation under D2 treatment from jointing to anthesis stage and anthesis to maturity stage was significantly higher than that under other treatments. The number of ears per unit area increased with the increase of planting density, but the difference between D2 and D3 treatments was not significant. The number of panicles and thousand-grain weight decreased with the increase of planting density, and the differences between D1 and D2 treatments were not significant, which were significantly higher than those under D3 and D4 treatments. Both grain yield and water use efficiency reached the maximum under D2 treatment of 9 158.71 kg · hm^{-2} and 17.21 kg · hm^{-2} · mm^{-1}, respectively. Under the condition of wide-width sowing, the planting density of 180×10^4 plants · hm^{-2} is the optimal treatment to construct a reasonable population structure, improve the population light use efficiency, grain yield and water use efficiency.

Key words: Planting density; Soil relative water content; Population structure; Canopy light interception; Water use efficiency; Dry matter accumulation; Grain yield

小麦生产中的常规条播易造成单行播幅窄、株距小、田间通风透光条件较差等问题,不利于籽粒产量的提高[1]。相比常规条播,宽幅播种的小麦苗带加宽,出苗均匀,有利于构建合理的群体结构;同时宽幅播种的小麦叶面积指数较常规条播大,群体具有较强的光能截获能力,籽粒产量显著增加[1-3]。适宜的种植密度有利于构建合理的群体结构,形成高质量群体,提高光能利用率,从而达到稳产高产的目标[4-5]。

研究表明,在播幅为 8 cm 条件下,当带间距分别为 7、12 和 17 cm 时,小麦品种矮抗 58 的叶面积指数在拔节期分别较常规条播增加 103.2%、75.7%和 43.0%,小麦品种兰考矮早 8 则分别增加 56.4%、23.6%、14.5%;两个品种籽粒产量较常规条播分别增加 4.80%～16.44%和 8.93%～21.05%[2-3]。Ren 等[6]认为,适期适量播种有利于减少小麦开花前土壤水分消耗,增加开花后水分消耗,从而提高产量和水分利用效率。在低、中、高三种播量(67.5、90.0 和 112.5 kg · hm^{-2})下,冬小麦产量、水分利用效率在早播条件下均以低播量最高,在晚播条件下均以高播量最高[7]。在自然栽培条件下,作物光能利用率仅为 0.5%～1.0%[8],远小于作物理论推算的光能利用率(4%～5%)[9]。前人对小麦种植密度效应的研究多在常规条播下进行,而关于宽幅播种条件下种植密度的效应则鲜有报道。本试验在宽幅播种条件下研究种植密度对小麦群体结构、叶面积指数、冠层截获、光能利用、干物质积累及籽粒产量的影响,以期为宽幅播种在小麦高产高效栽培中的推广应用提供理论与依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2018－2019 年在山东省济宁市兖州区小孟镇史家王子村院士试验站(35°24′ N，116°24′ E)进行，质地为壤土。小麦播前 0～20 cm 耕层土壤中有机质含量为 14.2 g·kg^{-1}，全氮含量为 1.24 g·kg^{-1}，碱解氮含量为 120.95 mg·kg^{-1}，速效磷含量为 31.19 mg·kg^{-1}，速效钾含量为 111.25 mg·kg^{-1}。小麦全生育期总降水量为 290.4 mm。

1.2 试验设计

供试小麦品种为济麦 22。试验采用随机区组设计，共 3 次重复。小麦采用菏泽郓城工力集团生产的宽幅精播机播种，播幅 8 cm，带间距 22 cm。试验设置 4 个种植密度处理，分别为 90×10^{4}株·hm^{-2}(D1)、180×10^{4}株·hm^{-2}(D2)、270×10^{4}株·hm^{-2}(D3)、360×10^{4}株·hm^{-2}(D4)。小区面积为 40 m^2(20 m×2 m)，小区间设置 2 m 宽隔离区。小麦播种前每公顷底施纯氮 105 kg、P_2O_5 150 kg 和 K_2O 150 kg，拔节期结合浇水开沟追施纯氮 135 kg·hm^{-2}。氮、磷、钾肥分别选用尿素、磷酸二铵和硫酸钾。采用带宽 65 mm 微喷带于小麦拔节期和开花期进行补灌，补灌目标为 0～40 cm 土层土壤相对含水量达到 70%[10]。2018 年 10 月 9 日播种，2019 年 6 月 14 号收获。其他管理措施同一般高产田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水量测定

于小麦返青期、拔节期、开花期、成熟期，用土钻取 0～100 cm 土层土样，20 cm 为 1 层，置于铝盒中，采用烘干法测定土壤质量含水量，并计算出土壤相对含水量[11-12]。

土壤质量含水量＝(鲜土质量－烘干土质量)/烘干土质量×100%

土壤相对含水量＝土壤质量含水量/田间持水量×100%

1.3.2 全生育期总耗水量测定

根据水分平衡法计算小麦整个生育时期耗水量(ET)[13]。$ET=\Delta S+M+P_r+K$。式中 ΔS 为土壤贮水消耗量(mm)，M 为灌水量(mm)，P_r 为降水量(mm)，K 为地下水补给量(单位为 mm；当地下水埋深大于 2.5 m 时，K 值可忽略不计)。

1.3.3 群体动态的测定

于小麦播种后，分别在返青期、拔节期、开花期、成熟期，各小区内定 1 m 双行法测定群体总茎数，共 3 次重复。

1.3.4 叶面积指数、冠层光合有效辐射及光能利用率的测定

用英国 Delta 公司生产的 Sunscan 作物冠层分析仪于小麦花 0 d、花后 7 d 和花后 14 d 晴朗无云天气，测定叶面积指数(LAI)；于小麦花后 7 d 测定冠层光合有效辐射(PAR)和近地面处的光合有效辐射(TPAR)，测定时光传感器跨越 4 行小麦，与小麦种植行向呈 45°方向水平放置，探头感光面向上；外置探头水平放置于麦穗上方 50 cm 处，测定自然光照下的 PAR。计算冠层光合有效辐射(PAR)截获率(CaR)、透射率(PeR)、截获量(IPAR)、光合有效辐射转化率(PCE)、光合有效辐射利用率(PUE)[14-15]，光合有效辐射利用率视为光能利用率。CaR＝(PAR－TPAR)/PAR×100%；PeR＝TPAR/PAR×100%；IPAR＝R×CaR×0.5；PCE＝(成熟期干物质量－开花期干物质量)/IPAR；PUE＝IPAR/R×PCE。R 表示实际光合有效辐射总量，数据来源于试验基地气象观测站。

1.3.5 干物质积累量测定

于返青期、拔节期、开花期和成熟期进行取样，其中返青期、拔节期取整株样品，开花期植株样品分为叶片、茎秆＋叶鞘、穗 3 部分，成熟期植株样品分为籽粒、叶片、茎秆＋叶鞘、颖壳＋穗轴 4 部分，3 次重复，80 ℃烘干至恒重，测定干物质重，计算阶段干物积累量[16]。阶段干物质积累量＝阶段末干物质积累量－阶段初干物质积累量。

1.3.6 籽粒产量及水分利用效率测定

成熟期小麦收获脱粒，籽粒自然风干至含水量为 12.5%称重并计算产量，3 次重复。计算水分利用效率(即籽粒产量/生育期耗水量)[17]。

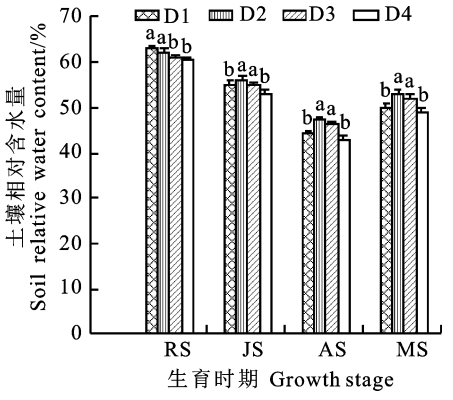
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件和 Sigma Plot 12.5 软件进行数据分析和绘图，用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 种植密度对各生育时期麦田 0～100 cm 土层土壤相对含水量的影响

由图1可知，增加种植密度对返青期麦田土



RS: 返青期; JS: 拔节期; AS: 开花期; MS: 成熟期。图柱上的字母不同表示同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

RS: Revival stage; JS: Jointing stage; AS: Anthesis stage; MS: Maturity stage. Different letters above the columns are significantly different among different treatments at the 0.05 level at the same stages. The same in figure 2.

图 1　种植密度对小麦各生育时期 0～100 cm 土层土壤相对含水量的影响

Fig. 1　Effect of planting density on relative water content of soil in 0－100 cm soil layer at different growth stages of wheat

壤相对含水量有降低作用,但 D1 与 D2 处理间及 D3 与 D4 处理间差异均不显著;在拔节期、开花期、成熟期,土壤相对含水量均表现为 D2 和 D3 处理均显著高于 D1、D4 处理,但 D1 与 D4 处理间及 D2 与 D3 处理间差异均不显著。这表明种植密度影响小麦对土壤水分的利用。

2.2　种植密度对小麦群体结构和叶面积指数(LAI)的影响

由表 1 可知,小麦群体总茎数在越冬期、返青期、拔节期均随种植密度的增加而增加;开花期、成熟期 D4 处理显著高于其他处理,D2 与 D3 处理间差异不显著,但 D2 和 D3 处理均显著高于 D1 处理。小麦的分蘖成穗率以 D2 处理最高,D4 处理最低,不同处理间差异显著。这表明适宜的种植密度可有效提高群体总茎数及分蘖成穗率,有利于产量形成。

由图 2 可知,花后 0～14 d,D2 与 D3 处理之间 LAI 差异不显著,但二处理均显著高于 D1、D4 处理,表明适宜的种植密度可增大绿叶面积,有利于小麦生育后期光合作用。

表 1　种植密度对小麦各生育时期群体总茎数及分蘖成穗率的影响

Table 1　Effects of planting density on total stem number and spike bearing rate of tiller of wheat population at different growth stages

处理 Treatment	群体总茎数 Total stem number/($\times10^4$ · hm^{-2})					分蘖成穗率 Spike bearing rate of tiller/%
	越冬期 Wintering stage	返青期 Revival stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Anthesis stage	成熟期 Maturity stage	
D1	653.3d	1 136.9d	1 068.1d	523.2c	510.2c	44.88b
D2	798.7c	1 320.2c	1 214.9c	705.7b	693.3b	52.51a
D3	1 018.6b	1 725.4b	1 628.3b	704.3b	693.1b	40.17c
D4	1 206.7a	2 106.7a	1 936.5a	785.6a	724.4a	34.89d

图列数据后的字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Different letters following the values in the same column indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level at the same stages. The same in tables 2－4.

2.3　不同处理对小麦冠层光截获及光能利用率的影响

由表 2 可知,花后 7 d,小麦冠层 PAR 截获量、截获率在 D2、D3 处理间均无显著差异,二处理均显著高于 D1 和 D4 处理,D4 处理最小;小麦冠层 PAR 透射率表现为 D4＞D1＞D2、D3,而小麦光能利用率表现为 D2、D3＞D1、D4。这表明合理的种植密度有利于提高冠层截获率、截获量,降低小麦冠层、光透射率,促进小麦对光能的利用,提高小麦光能利用率。

2.4　不同处理对小麦各生育阶段干物质积累的影响

由表 3 可知,返青至拔节阶段,D4 处理的小麦干物质积累量显著高于其他处理,D1 和 D2 处理较低且差异不显著;拔节至开花阶段和开花至成熟阶段,D2 处理的干物质积累量均最高,与其他处理差异均显著,D1 处理则最小。这表明适宜的种植密度可促进小麦干物质积累,高密度有利于小麦生育前期干物质积累,在生育中后期则会产生抑制作用。

2.5 种植密度对小麦籽粒产量及水分利用效率的影响

由表 4 可知，D2、D3 处理的单位面积穗数分别比 D1 处理增加 26.42%、26.55%，D4 处理分别比 D2、D3 处理增加 4.3%、4.1%，D2 和 D3 处理间无显著差异；D1、D2 处理之间穗粒数和千粒重均无显著差异，均显著高于 D3、D4 处理；D2 处理的籽粒产量和水分利用效率均显著高于其他处理，其中籽粒产量分别较 D1、D3、D4 处理增加 10.98%、5.82%、10.87%，水分利用效率分别提高 15.86%、10.75%、16.44%。这说明在宽幅播种条件下，D2 处理为高产、高水分利用效率的最优处理。

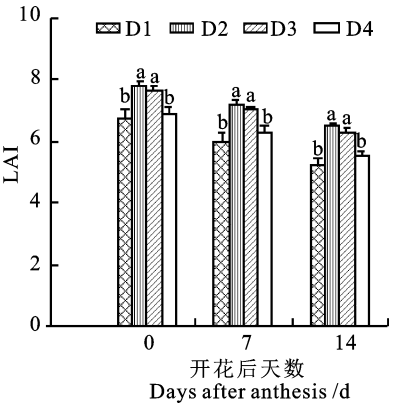


图 2 种植密度对小麦开花后叶面积指数(LAI)的影响

Fig. 2 Effect of planting density on leaf area index(LAI) of wheat after flowering

表 2 种植密度对小麦开花后 7 天冠层 PAR 截获量、截获率、透射率和光能利用率的影响

Table 2 Effect of planting density on canopy PAR interception, interception rate, transmittance and light use efficiency at 7 days after anthesis of wheat

处理 Treatment	截获量 Interception/(MJ · m^{-2})	截获率 Capture ratio/%	透射率 Penetration ratio/%	光能利用率 Light use efficiency/(g · MJ^{-1})
D1	8.79b	90.12b	9.88b	1.30b
D2	8.89a	94.86a	5.14c	1.39a
D3	8.84a	94.75a	5.25c	1.35a
D4	8.64c	88.16c	11.84a	1.27b

表 3 种植密度对小麦各生育阶段干物质积累量的影响

Table 3 Effect of planting density on dry matter accumulation at various wheat growth stages kg · hm^{-2}

处理 Treatment	返青至拔节 Revival to jointing	拔节至开花 Jointing to anthesis	开花至成熟 Anthesis to maturity
D1	3 222.69c	3 875.29c	3 452.74d
D2	3 283.39c	4 753.79a	4 221.14a
D3	3 544.17b	4 278.04b	4 047.33b
D4	3 643.42a	3 881.29c	3 588.76c

表 4 种植密度对小麦籽粒产量及水分利用效率的影响

Table 4 Effect of planting density on wheat grain yield and water use efficiency

处理 Treatment	穗数 Spike number/(×10^4 · hm^{-2})	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000 grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/(kg · hm^{-2})	水分利用效率 Water use efficiency/(kg · hm^{-2} · mm^{-1})
D1	510.16d	38.61a	42.06a	8 152.66d	14.48c
D2	693.34b	38.58a	42.03a	9 158.71a	17.21a
D3	694.58b	37.89b	39.31b	8 626.11b	15.36b
D4	724.35a	35.62c	36.14c	8 162.71c	14.38d

3 讨 论

有研究表明，小麦在整个生育时期的土壤含水量随种植密度的增加呈先增后降趋势，在 200 株 · m^{-2} 种植密度下达到最大值[18]。Zhang 等[19]指出，种植密度对黄土高原常规种植小麦的土壤水分含量有显著影响，并且土壤贮水量随播种密度增加而降低，表明小麦种植密度影响土壤

水分特征。本试验结果指出,在宽幅播种条件下,种植密度亦会调节土壤含水量,其中在 180×10^4 株·hm^{-2} 种植密度下 0～100 cm 土层土壤相对含水量在拔节期后能保持较高水平,比 360×10^4 株·hm^{-2} 种植密度下土壤相对含水量提高 2.50%～8.99%,满足了小麦生长后期对水分需求,为小麦生长发育提供了较好的生长环境,从而提高小麦籽粒产量。

小麦叶面积指数与光能截获率呈现显著函数关系,种植密度可调节叶面积指数,使光能截获率在适宜的密度下达到最大值,促进群体对光能的利用。有研究表明,增加种植密度能够减少小麦漏光损失,提高光能截获量[9]。冬性品种尧麦 16 适期播种时,在播量 225×10^4～375×10^4 粒·hm^{-2} 条件下,叶面积指数随播量的增大呈递增趋势,最大值可达 9.7[20]。在 180×10^4～360×10^4 株·hm^{-2} 种植密度下,半冬性品种周麦 22 的光能利用率随种植密度的升高呈先升后降趋势[21]。随种植密度的增加,品种安农 0711 开花期的 IPAR(冠层光合有效辐射截获量)呈上升趋势,在种植密度 330×10^4 株·hm^{-2}、施氮量为 270 kg·hm^{-2} 处理下达到最大值[5]。本试验在宽幅播种条件下,开花后的叶面积指数及冠层截获率均随种植密度的增加呈先增后降的趋势,均在 180×10^4 株·hm^{-2} 种植密度下达到最大值,且具有较高的分蘖成穗率和光能利用率。可见,适宜的种植密度可促进小麦对光能的有效利用,有利于构建合理群体结构和干物质积累量。

种植密度对小麦产量及其构成因素、干物质的积累与分配均有极显著的影响。有研究表明,种植密度过低会导致小麦穗数不足,使籽粒产量降低;种植密度过大,会导致无效分蘖较多,造成前期群体干物质积累量大,在拔节后无效分蘖大量死亡,减缓群体干物质积累[22]。在 225 kg·hm^{-2} 施氮条件下,小麦品种烟农 19、安农 0711 的籽粒产量均随种植密度的增加呈先增后降的趋势,均在 270×10^4 株·hm^{-2} 种植密度条件下达到最大值[5]。前人在宽幅播种条件下,研究认为大穗小麦品种的种植密度为 410×10^4 株·hm^{-2} 时产量最高,较最低密度增产 26.70%[23]。本试验采用中穗型小麦品种研究表明,在宽幅播种条件下,种植密度为 180×10^4 株·hm^{-2} 时,拔节至成熟期干物质积累量、籽粒产量和水分利用效率均最高。可见,适宜的种植密度有利小麦生育中后期的干物质积累,增加产量和水分利用效率。在本试验宽幅播种条件下,180×10^4 株·hm^{-2} 是小麦高产高效的最佳种植密度。有关宽幅播种下种植密度对小麦根系分布及根系特性的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1]段剑钊,李世莹,郭彬彬,等.宽幅播种对冬小麦群体质量及产量的影响[J].核农学报,2015,29(10):2019.
DUAN J W,LI S Y,GUO B B,*et al*. Effects of wide sowing on population quality and yield of winter wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2015,29(10):2019.

[2]李世莹,冯 伟,王永华,等.宽幅播种带间距对冬小麦冠层特征及产量的影响[J].植物生态学报,2013,37(8):767.
LI S Y,FENG W,WANG Y H,*et al*. Effects of wide-sown sowing belt spacing on canopy characteristics and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2013,37(8):767.

[3]李世莹,王永华,冯 伟,等.宽幅带播对大穗型冬小麦冠层特征及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(2):324.
LI S Y,WANG Y H,FENG W,*et al*. Effects of wide-band planting on canopy characteristics and yield of large-ear type winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2013,33(2):324.

[4]张向前,陈 欢,赵 竹,等.密度和行距对早播小麦生长、光合及产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(1):91.
ZHANG X Q,CHEN H,ZHAO Z,*et al*. Effects of density and row spacing on growth,photosynthesis and yield of early sowing wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2015,35(1):91.

[5]黄 波,张 妍,孙建强,等.氮密互作对淮北砂姜黑土区冬小麦冠层光合特性和产量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(8):1002.
HUANG B,ZHANG W,SUN J Q,*et al*. Effects of nitrogen-density interaction on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat canopy in Shajiang black soil region of Huaibei [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2019,39(8):1002.

[6]REN A X,WANG P R,SUN M,*et al*. Optimization of sowing date and seeding rate for high winter wheat yield based on pre-winter plant development and soil water usage in the Loess Plateau,China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2019,17:42.

[7]田 欣,孙 敏,高志强,等.播期播量对旱地小麦土壤水分消耗和植株氮素运转的影响[J].应用生态学报,2019,10(28):11.
TIAN X,SUN M,GAO Z Q,*et al*. Effects of sowing time and sowing amount on soil water consumption and plant nitrogen operation in drought-land wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2019,10(28):11.

[8]张黛静,马 雪,王晓东,等.品种与密度对豫中地区小麦光合生理特性及光能利用率的影响[J].麦类作物学报,2014,34(3):394.

ZHANG J, MA X, WANG X D, *et al*. Effects of variety and density on photosynthetic and physiological characteristics and light energy utilization of wheat in central Henan region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(3): 394.

[9]王云奇, 陶洪斌, 赵 鑫, 等. 非灌溉条件下播前深松对冬小麦水分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 70.
WANG Y Q, TAO H B, ZHAO X, *et al*. Effects of pre-planting deep pine on water utilization and yield of winter wheat under non-irrigation conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(1): 70.

[10]韩占江, 于振文, 张永丽, 等. 测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(3): 465.
HAN Z J, YU Z W, ZHANG Y L, *et al*. Effects of mulching irrigation on dry matter accumulation and distribution and water use efficiency of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(3): 465.

[11]PATANE C, COSENTINOS L. Yield, water use and radiation use efficiencies of kenaf(*Hibiscus cannabinus* L.) under reduced water and nitrogen soil availability in a semiarid Mediterranean area [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 46: 62.

[12]LLOVERAS J, MANENT J, VIUDAS J, *et al*. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1265.

[13]DONG Z Y, ZHANG X D, LI J, *et al*. Photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat(*Triticum aestivum* L.) in response to fertilizer, precipitation, and soil water storage before sowing under the ridge and furrow system: A path analysis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 273: 12.

[14]党建友, 裴雪霞, 张定一, 等. 灌溉方法与施氮对土壤水分、硝态氮和小麦生长发育的调控效应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1169.
DANG J Y, QI X X, ZHANG D Y, *et al*. Effects of irrigation methods and nitrogen application on soil moisture, nitrate nitrogen and wheat growth and development [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1169.

[15]李贺丽, 罗 毅, 薛晓萍, 等. 冬小麦冠层对入射光合有效辐射吸收比例的估算方法评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 206.
LI H L, LUO Y, XUE X P, *et al*. Evaluation of the estimation method of the effective radiation absorption ratio of winter wheat canopy to incident photosynthetic [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 206.

[16]陈雨露, 康 娟, 王家瑞, 等. 灌水与施磷对小麦氮素积累运转及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(9): 1095.
CHEN Y L, KANG J, WANG J R, *et al*. Effects of irrigation and phosphorus application on nitrogen accumulation and water use efficiency and water use efficiency in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(9): 1095.

[17]LIU Y, YAO C S, SONG W Y, *et al*. Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 224.

[18]陈思怿, 李升峰, 朱继业. 种植密度对小麦根际土壤特性及籽粒产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 132.
CHEN S Y, LI S F, ZHU J Y. Effects of planting density on wheat rhizosphere soil characteristics and grain yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(4): 132.

[19]ZHANG S L, SADRASC V, CHEN X P, *et al*. Water use efficiency of dry land wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management [J]. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9.

[20]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): 365.
SHI X F, QIU S Y, SHI Z L, *et al*. Effects of sowing date and sowing amount on population traits and yield of winter wheat Yaomai 16 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 365.

[21]张黛静, 王 真, 李雪梅, 等. 不同群体下小麦花期干物质转运和冠层光分布特性研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(10): 28.
ZHANG D J, WANG Z, LI X M, *et al*. Characteristics of dry matter transport and canopy light distribution in wheat under different populations during flowering period [J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(10): 28.

[22]韩金玲, 杨 晴, 周印富, 等. 冀东地区种植密度对小麦京冬 8 号抗倒伏能力和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 667.
HAN J L, YANG Q, ZHOU Y F, *et al*. Effects of planting density on lodging resistance and yield of wheat Jingdong 8 in East Hebei [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(5): 667.

[23]郑飞娜, 初金鹏, 张 秀, 等. 播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J]. 作物学报, 2019, 18(9): 10.
ZHENG F N, CHU J P, ZHANG X, *et al*. Regulating effects of interaction between sowing method and planting density on yield and nitrogen use efficiency of large spike wheat varieties [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 18(9): 10.