

柯媛媛,陈翔,倪芊芊,等.小麦干物质积累与分配规律研究进展[J/OL].大麦与谷类科学,2021,38(3):1-7,12.https://doi.org/10.14069/j.cnki.32-1769/s.2021.03.001.

小麦干物质积累与分配规律研究进展

柯媛媛¹,陈翔¹,倪芊芊¹,张乐乐¹,魏凤珍¹,李金才^{1,2*}

(1.安徽农业大学农学院/农业部华东地区作物栽培科学观测站,安徽合肥230036;

2.江苏省现代作物生产协同创新中心,江苏南京210095)

摘要:干物质的积累与分配是反映小麦群体生长状况的重要指标。本文阐述了小麦干物质积累与分配的一般规律及与产量之间的关系,并综述了基因型和播期、密度、水分、氮肥等栽培因子及光照、温度等生态因子对小麦干物质积累和分配的影响。在今后的研究中,应充分运用分子生物学等相关技术推动小麦种质资源的利用和新品种的选育;通过表型组学和作物模型等深入研究小麦干物质积累过程机理,实现对小麦群体的早期诊断和定量调控;应集成多项生产技术,实现小麦生产的可持续发展,以期小麦群体生长状况的调控及我国小麦的高产稳产和优质提供理论参考。

关键词:小麦;干物质;栽培因子;生态因子

中图分类号:S512.1

文献标志码:A

文章编号:1673-6486-20210022

自1860年工业革命以来,全球气候显著变暖^[1]。据最新的全球表面温度观测数据集^[2-3]分析得出,1900—2017年间全球陆地平均气温升高(1.00±0.06)℃/100年。气候变化增加了粮食生产的不稳定性,而2050年全球人口预计将达到96亿,保障全球96亿人口的粮食安全问题将成为2050年面临的巨大挑战。为满足日益增长的粮食需求,小麦生产力每年需增加1.6%^[4]。解伟等通过构建Meta回归模型得出,全球平均气温每升高1℃,将导致我国主要粮食作物的单位面积产量降低2.6%^[5]。小麦作为世界三大粮食作物之一,全球约60%的人口以小麦为主食^[6]。在全球气候复杂多变和人口激增的背景下,维护小麦生产的稳定性对保障粮食安全具有极其重要的意义。

小麦干物质的积累与分配过程反映了小麦群体生长状况的好坏,也是决定小麦籽粒产量的重要因素。了解小麦在大田生长中干物质积累与分配的

一般规律,以及基因型、主要栽培因子和生态因子对小麦干物质积累与分配的影响,对小麦生长发育状态的调控及建立高产群体结构具有重要意义。本文系统综述了小麦干物质积累与分配的一般规律,并阐述基因型、栽培因子和生态因子对小麦干物质积累与分配的影响,以期改善小麦的种植制度,完善农田生态系统以及提高我国小麦生产能力提供参考。

1 小麦干物质积累与分配的一般规律

1.1 小麦干物质的积累规律

作物产量的高低与干物质积累过程密切相关,分析作物生长过程中干物质的积累动态对揭示作物产量形成和构建高效群体具有重要实践价值^[7]。研究表明,随着小麦生长发育进程的推进,叶片和茎鞘的干物质积累量呈单峰曲线,而穗和植株的干物质积累量呈“S”型曲线变化^[8]。小麦在不同生育时期,干物质积累速率并不相同。陈宏等研究发现,开花期以前是小麦单茎干物质积累量的缓增期,开花期至灌浆期干物质积累量急剧加快,灌浆期后减缓^[9]。赵姣等通过Logistic曲线拟合越冬后小麦干物质的积累过程,表明孕穗至开花期小麦干物质积累速率最大,在拔节中后期之前和花后20d,干物质积累缓慢增加^[10]。此外,张黛静等通过¹³C稳定性同位素示踪技术发现,不同取样时期小麦净输入光合¹³C总

收稿日期:2021-03-03

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题(2017YFD0300408);安徽省科技重大专项(202003b06020021);安徽省自然科学基金(2008085QC122);安徽省省级大学生创新训练项目(S202010364127)。

作者简介:柯媛媛(1996—),女,硕士研究生,主要从事作物生理生态研究。E-mail: keyuanyuan916@163.com。

*通信作者:李金才(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事作物生理生态研究。E-mail: ljc5122423@126.com。

量范围为 21.71 ~ 94.06 mg/盆,随着生育期的推进,叶和茎鞘的光合碳逐渐向穗部转运,故叶和茎鞘部¹³C含量减少,穗部¹³C含量增加,表明小麦生长发育各个阶段,干物质在不同器官的积累量也不同^[1]。

1.2 小麦干物质分配规律

干物质在小麦各器官中的分配对于建立平衡的源库关系及指导小麦高产优质生产具有重要意义。开花期小麦干物质在不同器官中分配比例一般表现为茎鞘 > 叶 > 穗,且茎鞘和穗的干物质积累量与成熟期小麦植株干物质质量显著相关^[2]。郭增江等研究表明,灌浆前期籽粒中同化物占总生物量的 35.25% ~ 45.66%,颖壳 + 穗轴占 7.40% ~ 9.85%,茎秆占 27.58% ~ 39.75%;灌浆后期植株 70% 以上的同化物运送至籽粒中^[3]。Zhang 等研究表明,成熟期小麦籽粒、茎叶、穗轴 + 颖壳和旗叶的¹³C分布所占比例分别为 40.89%、31.09%、4.50% 和 2.19%^[4]。此外,小麦各器官干物质分配率达到峰值的时间不同。叶片的分配比例在拔节期达到最大,而后随着生育进程的推进呈现出不断降低的趋势,茎鞘所占比例呈先增后降的变化趋势且在孕穗期达到最大;穗所占比例呈不断增加趋势,并在成熟期达到最大值^[5]。小麦干物质在源库之间的合理分配利用对发挥最大产量潜力至关重要,应通过栽培措施的优化来改善源库关系,从而协调干物质在源库间的分配,实现小麦的稳产、丰产与优质。

1.3 小麦干物质积累、分配与产量的关系

小麦产量形成的过程,实质上是同化物的生产制造及转运分配的过程。小麦籽粒产量主要来自于花前贮存的同化物向籽粒的转运及花后叶、茎鞘等营养器官中光合同化物的积累^[6]。花前是小麦营养生长的重要阶段,此时干物质的积累可为小麦产量的形成奠定基础。研究发现,拔节—开花期小麦群体干物质积累量与总结实粒数呈显著二次曲线关系,说明此时期干物质积累量不宜过大,否则会导致无效分蘖增多,不利于建成平衡的群体生态结构,从而导致减产^[7]。杨佳凤等研究指出,孕穗—开花期干物质积累量与籽粒产量呈二次曲线关系,此时期适宜的干物质积累量是形成高产的基础^[8]。花后是籽粒灌浆的关键时期,该阶段较高的干物质积累量能保证小麦正常的灌浆能力^[7]。研究发现,小麦花前干物质转运量对产量的贡献率为 43.10% ~ 45.22%,与产量呈线性负相关;花后干物质积累量对产量的贡献率为 54.78% ~ 56.92%,与产量呈线

性正相关^[9]。因此,小麦群体后期干物质积累量是实现高产的关键,在合理调控拔节—开花期群体干物质积累量的基础上,应重点扩大花后干物质积累量。

2 小麦干物质积累与分配的影响因素

2.1 基因型对小麦干物质积累与分配的影响

因发育特点不同,不同基因型小麦的“源”“库”器官在调控干物质转运分配的作用上存在一定差异(图 1)。研究表明,小麦基因型是影响干物质转运和分配最主要的因素^[20],不同品种小麦花后干物质的积累量和花前干物质的运转能力对籽粒的贡献率存在差异^[21]。吴金芝等研究发现,晋麦 47 较偃展 4110 花前积累的干物质多,花前干物质运转能力强,且花前贮藏干物质对籽粒的贡献率大,从而获得较高产量^[22]。仝锦等研究表明,超高产品种能显著提高花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率,最终产量较高^[23]。

此外,不同基因型品种小麦的干物质积累速率不同,从而影响成熟期小麦籽粒产量。张利等研究发现,晚熟品种小麦较早熟品种的干物质积累平均速率高,最大速率也明显高于早熟品种,从而具有更强的生产潜势^[24]。李瑞珂等研究指出,高产小麦品种花前和花后干物质积累速率较低产小麦分别高 2.5 倍和 1.6 倍,适宜的干物质积累速率有利于小麦的高产优质^[25]。因此,掌握不同基因型小麦干物质积累及分配特性,通过改变其遗传特性选取高产高效型小麦品种,可增加小麦“源”器官的生产能力和“库”器官的容量,促进强“源”畅“流”扩“库”,从而实现高产。

2.2 栽培因子对小麦干物质积累与分配的影响

2.2.1 播期。播期主要通过影响小麦生育前期的积温及光照等生态条件,使小麦生长发育过程中干物质的运转分配也相应发生变化,从而影响小麦个体生长和群体建成^[26]。播期不同导致小麦冬前积温不同,造成苗期单株和群体分蘖的干物质积累量存在较大差异,进而影响小麦后续干物质的积累和产量形成。研究表明,因气温连续偏高,早播使小麦冬前出现旺长,甚至提前拔节,导致小麦遇春季低温易遭受冻害,进而使群体干物质积累量下降^[27]。播期推迟,使小麦冬前生长所需的有效积温大幅度降低,导致小麦冬前生长量不足,虽返青后干物质积累速率加快,但无法弥补叶面积减少所带来的干物质积

累量的损失,因此难以形成高产群体基础^[28-29]。适期晚播可提高小麦拔节—成熟期干物质生产量,从而增加成熟期干物质积累量,并结合较高的抗倒伏能力和收获指数获得较高产量^[30]。气候、土壤及农民耕种习惯等因素均会影响播期,从而影响小麦最终经济产量。因此在实际生产中,应通过多年播期试验,

结合作物品种、气候、土壤条件、栽培措施等因素,同时考虑播期与密度、水分及肥料等因素的互作效应,探究播期对小麦干物质积累与分配的调控效应,以实现最优的栽培因子组合,为小麦的高产优质提供理论依据。

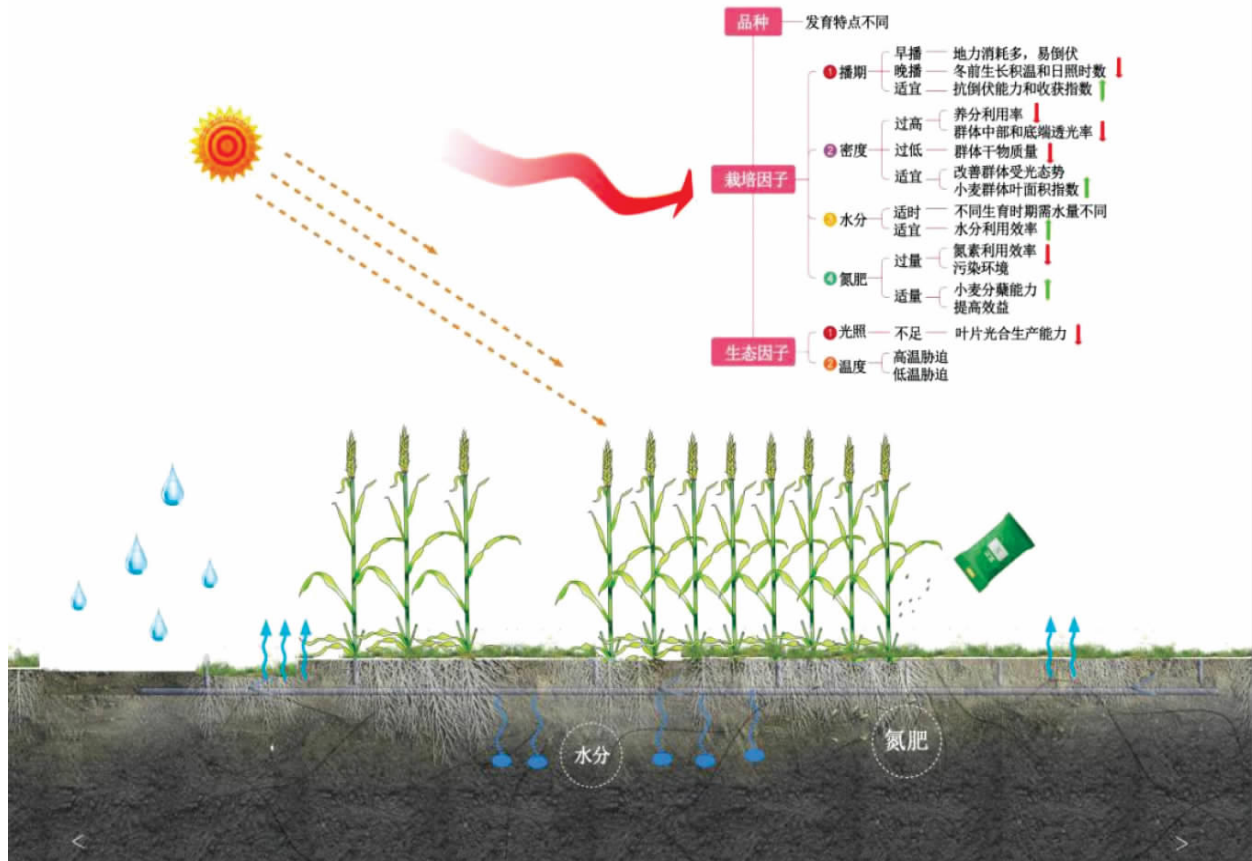


图1 影响小麦干物质积累与分配的因素

2.2.2 密度。密度作为高产栽培技术措施中重要的一环,主要通过影响小麦群体结构和光热资源的分配来影响小麦产量形成^[31]。密度过高会降低小麦对养分的利用率,加剧群体内部竞争,不利于产量形成^[32];群体密度过低,小麦干物质在各生育时期积累量均较低,同样不利于群体产量的提高^[33]。因此,明确密度与干物质积累与分配之间的关系,对于构建合理的群体结构从而实现小麦高产具有重要意义。刘娟等基于归一化法,认为小麦干物质积累中期(快增期)是干物质积累速率对密度的敏感反应期^[34]。而播量过大会降低小麦叶片的光能利用率,过度消耗土壤水分,导致叶片的光合能力下降,干物质积

累减少。丁位华等研究发现,播量过大会使小麦整个生育期群体光合速率较高,但中部和底端透光率较小,光能利用率较低,从而导致小麦群体干物质积累量和产量降低^[35]。Reddy等认为,过高的种植密度会消耗过多的土壤水分,使小麦开花期土壤含水量较低,导致气孔导度和光合能力下降,从而影响干物质的积累^[36-37]。适宜播量会改变小麦群体结构,改善群体受光态势,促进群体对光能充分利用,增加干物质的积累,从而提高产量^[38]。因此,适宜的密度会提高小麦群体数量和叶面积指数,延长叶片光合功能期,优化群体光合性能,从而促进小麦干物质的积累。

2.2.3 水分。不同生育时期小麦对水分的需求不同,土壤水分过多或不足及灌水时期都会对小麦干物质的积累与分配造成影响。Zhang 等研究表明,灌溉至季节性水分蒸发量的 94%时,小麦成熟期干物质积累量最高^[39]。姚宁等研究发现,在越冬期和返青期对小麦进行干旱处理,拔节后生物量显著降低且后期复水无法弥补^[40]。韩惠芳等研究指出,拔节期灌溉有利于小麦贮藏物质的积累,同时拔节水和抽穗水更有利于提高贮藏物质的转运效率^[41]。此外,水分胁迫对小麦不同营养器官干物质累积的影响不同,其中对叶片的影响最大,对穗的影响最小^[42],复水后小麦植株各器官的干物质累积和产量均有不同程度的恢复^[43]。

水分是小麦干物质积累与分配的重要限制因子,不同的灌水处理造成土壤水分的差异,而小麦营养器官贮存的同化物受土壤水分含量的调控^[44]。适时适量灌溉可缓解土壤水分缺乏,提高水分利用效率,促进小麦干物质积累^[45]。谷艳芳等研究发现,干旱胁迫下,冬小麦植株和器官水平上干物质积累量均显著下降,干物质分配趋向生长中心,花后同化物的积累量减少 50%,但营养器官干物质的转运量会增加 30%以上^[46-47]。适宜的水分有利于增加小麦地上部植株和不同器官(叶片、茎鞘、颖壳)的干物质质量,促进籽粒产量形成^[48]。因此,在小麦生产中,可在小麦关键生育时期通过合理供水来提高水分利用效率,从而增加干物质积累量和调控物质转运,最终提高产量。

2.2.4 氮肥。氮肥是调节小麦干物质转运能力从而实现小麦高产栽培的重要养分限制因子。合理增施氮肥对小麦器官建成和营养物质分配有正向调控作用,能够协同提高干物质积累量和干物质转运能力,从而实现高产^[49]。研究表明,在一定范围内适量增施氮肥可以提高小麦花后干物质积累量及其向籽粒中的转运效率^[50]。蔡瑞国等研究指出,适量施氮提高了小麦干物质积累量,同时促进花前贮存干物质向穗部的转运,有利于产量三因素的协调发展^[51]。李娜等研究表明,适宜的施氮量有助于增强植株生长后期光合作用能力和提高分蘖能力,协调小麦花前和花后干物质积累,促进营养物质向籽粒快速转移,从而提高花后光合产物对籽粒的贡献率,对小麦增产具有重要意义^[52]。

然而,在小麦生产中为追求高产过量施用化肥的现象屡见不鲜,这不仅极易造成氮素损失,导致

小麦氮素利用效率以及氮农学利用效率降低,不利于资源可持续发展,同时也给农田环境带来巨大压力^[53-54]。研究表明,目前农业系统中的氮肥盈余量已经达到 175 kg/hm²^[55],过量施氮使群体结构变差,导致干物质积累量减少,小麦花后物质生产量增幅较小甚至下降^[52]。因此,根据地区和品种的不同来判断最适宜的氮施用量,不仅可以有效控制成本、提高效益,还可以合理分配和充分利用氮肥资源,减少农业生产过程中养分损失和对环境造成的负面影响,使小麦同化物合成、贮存和转运三者相协调,挖掘小麦产量潜力。

2.3 生态因子对小麦干物质积累与分配的影响

2.3.1 光照。光照是影响小麦干物质积累和产量的重要环境因子,小麦的生产潜力很大程度取决于接受太阳光照的多寡以及光能利用率的高低。在黄淮海区,雾霾、阴雨寡照等因素引起的弱光问题已成为限制小麦高产的重要因素^[56],弱光造成小麦接受有效光合辐射减少,使光化学反应速率和气孔开度下降,从而影响小麦干物质的积累。据报道,黄淮海地区的光照度以每年 0.6%的速度下降,导致小麦叶片光合速率降低,严重影响小麦生产^[57]。顾蕴倩等通过构建 SUCROS 模型发现,日总光合有效辐射低于 3.71 MJ/m²且持续 4 d 以上对小麦干物质的积累和产量产生显著影响^[58]。此外,弱光会降低小麦“源”器官叶片干物质的生产能力,同时阻碍干物质向“库”器官穗部的转运,最终导致产量降低。Xu 等研究发现,弱光会影响小麦干物质积累和同化物向籽粒的运输,导致产量下降^[59]。刘希伟等研究指出,花后不同阶段遮光处理均会导致小麦光合速率下降,干物质生产不足,籽粒灌浆速率降低,进而影响产量^[60]。李刘龙等研究发现,弱光条件下籽粒的“库吸力”降低,使植株贮藏的同化物更多地滞留在营养器官中,用于维持“源”器官的功能代谢,导致干物质在小麦“库”器官穗部干物质的积累量减少^[61]。因此,光照不足会使小麦功能叶片光合产物供应不足,直接影响到干物质的积累与分配,从而导致减产。

2.3.2 温度。温度是小麦进行营养生长和生殖生长的重要生态因子,小麦完成其生命周期需要一定的积温^[62]。马倩倩等通过皮尔逊相关性分析等方法研究发现,小麦全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 3 500 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 左右,播种-成熟期 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温约为 2 200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ^[63]。小麦的生长发育在不同的生育时期所要求的温度也不同。小麦播种的适宜温度为 15~16 $^{\circ}\text{C}$,而出苗后温度需

要降到 5~6°C, 拔节到抽穗期则要求温度逐渐升高, 最后达到 21~22°C^[64]。然而, 全球气候变暖的加剧导致极端温度事件频发, 严重威胁到小麦生产^[65]。高温胁迫会加速叶片衰老, 缩短叶片中光合产物向籽粒中的运输时间, 导致籽粒灌浆终止早于叶片完全衰老, 叶片光合产物被分配到其他营养器官中^[66], 抑制了籽粒中干物质的积累, 最终影响粒质量和产量。张姍等研究发现, 高温胁迫导致的花后干物质积累量和花前干物质运转率共同降低可能是籽粒产量降低的主要原因^[67]。

而低温则会导致小麦叶片的光合速率、蒸腾速率和叶片气孔导度显著下降, 胞间 CO₂ 浓度大幅升高, 导致干物质积累减少, 从而造成减产^[68]。张溪荷等研究发现, 低温胁迫导致茎秆干物质向穗部的转运受阻, 营养物质累积在茎秆中, 所以茎秆分配比例升高, 穗分配比例降低^[69]。因此, 温度胁迫主要通过减少小麦籽粒灌浆时间和降低叶片光合速率等一系列生理生化过程来降低干物质的积累量和分配, 最终导致小麦减产。

3 展望

3.1 运用分子生物学技术选育小麦新品种

小麦的产量和品质是受多基因和环境互作影响的复杂数量性状, 单纯依靠现有常规育种技术耗时长、成本高^[70], 难以满足全球日益增长的粮食需求, 小麦基因组和分子遗传育种的发展为进一步解决世界粮食问题提供了新的契机和突破口。因此, 应利用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术^[71]和分子标记辅助育种, 借助转录组、蛋白质组、代谢组等多组学技术加快对小麦功能基因的定位, 从而加快推动种质资源的利用和新品种的选育。

3.2 利用作物表型组学、作物模型等探索小麦干物质积累过程机理

定量分析小麦生长过程中各项指标的动态变化是揭示产量形成和掌握群体调控指标的重要内容。高通量表型组学通过从微观到宏观、从超微到器官再到个体乃至群体的多维度数据以实现作物不同层次的监控, 从而获取作物不同生长发育阶段的动态性状, 对作物群体的早期诊断和定量调控具有重要意义。今后, 应充分利用各种作物表型数据库, 并结合 Richards、Logistic、Compertz 等生长模型探索干物质积累过程机理^[71-73], 深入研究各影响因素与干物质积累的定量关系, 为提升小麦干物质

积累的途径提供新思路。

3.3 集成多项生产技术实现农业可持续发展

随着农业资源供需矛盾的加剧, 小麦生产的可持续性成为研究的焦点。未来应集成多项节水、绿色、高效生产技术模式, 通过推广自动驾驶、卫星平地、精量播种、精准施肥、智能灌溉、无人植保、智慧收获等多项智能化技术, 推动小麦生产向节水、稳产、绿色、优质、高效种植发展, 并且结合地区的气候特点、灾害发生规律以及生产条件等, 在提高系统生产效率和可持续性的基础上实现精细化农业管理, 从而实现小麦生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] HARTMANN D L, KLEIN TANK A M G, RUSICUCCI M, et al. Observations: Atmosphere and Surface[M]/STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013: 159-254.
- [2] XU W H, LI Q X, JONES P, et al. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(7): 2513-2536.
- [3] YUN X, HUANG B Y, CHENG J Y, et al. A new merge of global surface temperature datasets since the start of 20th century[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1629-1643.
- [4] 傅向东, 刘倩, 李振声, 等. 小麦基因组研究现状与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(9): 909-914.
- [5] 解伟, 魏玮, 崔琦. 气候变化对中国主要粮食作物单产影响的文献计量Meta分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(1): 79-85.
- [6] PARRY M A J, REYNOLDS M, SALVUCCI M E, et al. Raising yield potential of wheat. II. increasing photosynthetic capacity and efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(2): 453-467.
- [7] YAN D C, ZHU Y, WANG S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2): 93-105.
- [8] 吴桢, 张保军, 海江波, 等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(10): 1377-1382.
- [9] 陈宏, 张保军, 海江波, 等. 基肥和播种密度对冬小麦干物质积累及光合特性和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(12): 1969-1977.
- [10] 赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2):

- 300-308.
- [11] 张黛静,陈倩青,宗洁静,等. 增施有机肥对冬小麦同化物积累与分配的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(6):1869-1876.
- [12] 丁锦峰,陆成彬,王云翠,等. 长江中下游稻茬小麦超高产群体干物质积累与分配特性[J]. 麦类作物学报,2012,32(6):1118-1123.
- [13] 郭增江,于振文,石玉,等. 不同土层测墒补灌对小麦旗叶光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2014,40(4):731-738.
- [14] ZHANG H B,HAN K,GU S B,et al. Effects of supplemental irrigation on the accumulation, distribution and transportation of ^{13}C -photosynthate,yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*,2019,214:1-8.
- [15] 雷钧杰,张永强,赛力汗·赛,等. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配及转运特征的影响[J]. 新疆农业科学,2016,53(1):77-83.
- [16] 周玲,王朝辉,李富翠,等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析[J]. 生态学报,2012,32(13):4123-4131.
- [17] 朱新开,郭文善,范琦,等. 小麦不同产量群体干物质积累指标差异研究[J]. 天津农学院学报,2004(3):10-15.
- [18] 杨佳凤,丁锦峰,顾后文,等. 稻茬晚播小麦高产群体物质积累特性研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2013,34(2):55-59.
- [19] 吕广德,王瑞霞,牟秋焕,等. 玉米小麦周年氮肥运筹对砂浆黑土区小麦干物质及氮素积累分配和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(8):972-980.
- [20] ARDUINI I,MASONI A,ERCOLI L,et al. Grain yield,and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate[J]. *European Journal of Agronomy*,2006,25(4):309-318.
- [21] 高玉红,吴兵,崔红艳,等. 不同旱地春小麦新品种(系)干物质积累和产量形成的特点[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(5):1-6.
- [22] 吴金芝,王志敏,李友军,等. 干旱胁迫下不同抗旱性小麦品种产量形成与水分利用特征[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):25-35.
- [23] 仝锦,孙敏,任爱霞,等. 高产小麦品种植株干物质积累运转、土壤耗水与产量的关系[J]. 中国农业科学,2020,53(17):3467-3478.
- [24] 张利,隋新霞,王羽,等. 不同熟性小麦品种的干物质积累和分配规律[J]. 山东农业科学,2007,39(6):54-56.
- [25] 李瑞珂,汪洋,安志超,等. 不同产量类型小麦品种的干物质和氮素积累转运特征[J]. 麦类作物学报,2018,38(11):1359-1364.
- [26] 聂彦文,任永哲,高翔,等. 播期对不同感温性小麦品种生长发育及产量的影响[J]. 贵州农业科学,2018,46(6):45-50.
- [27] 裴雪霞,王姣爱,党建友,等. 基因型和播期对优质小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):1109-1115.
- [28] 范金平,陆成彬,吴建中,等. 不同晚播条件对‘扬麦20’产量和品质的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(8):1-4.
- [29] 张明伟,王梦尧,马泉,等. 稻茬晚播小麦不同品种产量及群体特征和氮效应比较研究[J]. 麦类作物学报,2020,40(7):832-842.
- [30] 铃太峰,董秀春,张秀,等. 播期对冬小麦干物质积累、分配与产量的影响[J]. 山东农业科学,2019,51(3):24-28,35.
- [31] 陈猛,梁雪齐,李玲,等. 种植密度对匀播冬小麦干物质积累、运转及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(2):238-244.
- [32] JIN X L,LI Z H,YANG G J,et al. Winter wheat yield estimation based on multi-source medium resolution optical and radar imaging data and the AquaCrop model using the particle swarm optimization algorithm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2017,126:24-37.
- [33] 王伟,王新盛,姚婵,等. 基于无人机影像的小麦植株密度估算方法研究[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):111-119.
- [34] 刘娟,熊淑萍,杨阳,等. 基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型[J]. 生态学报,2012,32(17):5512-5520.
- [35] 丁位华,姜小苓,冯素伟,等. 播量对BNS型杂交小麦群体光合特性、物质积累和产量的影响[J]. 华北农学报,2020,35(4):113-119.
- [36] REDDY R A,CHAITANYA K V,VIVEKANANDAN M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. *Journal of Plant Physiology*,2004,161(11):1189-1202.
- [37] FANG Y,XU B C,Turner N C,et al. Grain yield,dry matter accumulation and remobilization,and root pruning[J]. *European Journal of Agronomy*,2010,33(4):257-266.
- [38] SHI Z L,WANG F,LI X,et al. Dry matter and nitrogen accumulation as affected by nitrogen fertilization and seeding rate in winter wheat[J]. *American Journal of Agriculture and Forestry*,2018,6(3):50-59.
- [39] ZHANG X Y,WANG Y Z,SUN H Y,et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. *Irrigation Science*,2013,31(5):1103-1112.
- [40] 姚宁,宋利兵,刘健,等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(12):2379-2389.
- [41] 韩惠芳,李全起,董宝娣,等. 灌溉频次和时期对冬小麦籽粒产量及品质特性的影响[J]. 生态学报,2010,30(6):1548-1555.
- [42] 陈晓远,高志红,罗远培,等. 水分胁迫效应对冬小麦生长发育的影响研究[J]. 华北农学报,2004,19(3):43-46.

- [43] 李彦彬,朱亚南,李道西,等. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(8):76-82.
- [44] KAUR K, GUPTA A K, KAUR N. Effect of drought and sowing time on stem reserve mobilization and sink activity in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Agrochimica*,2012,56(1):42-54.
- [45] 傅晓艺,王红光,刘志连,等. 不同水分处理对小麦氮素和干物质积累与分配的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(8):955-963.
- [46] 谷艳芳. 不同水分处理下冬小麦光合产物分配格局、过程及调控机制的研究[D]. 开封:河南大学,2008.
- [47] BAHRANI A, ABAD H H S, SARVESTANI Z T, et al. Remobilization of dry matter in wheat: effects of nitrogen application and post-anthesis water deficit during grain filling[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*,2011,39(4):279-293.
- [48] 周齐齐,张玉春,张敏,等. 水分对小麦植株物质积累和籽粒品质影响的研究进展[J]. 河北科技师范学院学报,2017,31(4):21-26,44.
- [49] 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.
- [50] 钱宏兵,朱德进,于倩倩. 氮素营养水平对中筋小麦扬麦16产量和氮素吸收的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(6):71-73.
- [51] 蔡瑞国,张迪,张敏,等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):194-202.
- [52] 李娜,张保军,张正茂,等. 不同施氮量和播量对‘普冰151’干物质积累特征及籽粒灌浆特性的影响[J]. 西北农业学报,2017,26(5):693-701.
- [53] 国家小麦产业技术体系. 中国小麦产业技术发展报告[M]. 北京:中国农业出版社,2015:118.
- [54] 串丽敏,何萍,赵同科,等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. 应用生态学报,2015,26(1):76-86.
- [55] 徐新朋,王秀斌,李大明,等. 双季稻最佳磷肥和钾肥用量与密度组合研究[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(3):598-608.
- [56] 徐彩龙,尹燕桦,蔡瑞国,等. 弱光条件下不同穗型小麦品种旗叶光合特性和抗氧化代谢[J]. 作物学报,2012,38(7):1295-1306.
- [57] QIAN Y, WANG W G, LEUNG L R, et al. Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: the role of aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*,2007,34(12):L12804.
- [58] 顾蕴倩,刘雪,张巍,等. 灌浆期弱光逆境对小麦生长和产量影响的模拟模型[J]. 中国农业科学,2013,46(5):898-908.
- [59] XU C L, TAO H B, WANG P, et al. Slight shading after anthesis increases photosynthetic productivity and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to the delaying of leaf senescence[J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2016,15(1):63-75.
- [60] 刘希伟,张敏,宋霄君,等. 糯小麦和非糯小麦干物质积累及产量对灌浆期不同阶段弱光的响应[J]. 麦类作物学报,2015,35(6):873-879.
- [61] 李刘龙,库旭灿,李赞,等. 花后弱光对江汉平原稻茬小麦的产量及碳、氮分配效应的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(11):1364-1374.
- [62] TAO F L, ZHANG S, ZHANG Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics[J]. *European Journal of Agronomy*,2012,43:201-212.
- [63] 马倩倩,贺勇,张梦婷,等. 中国北部冬麦区小麦生育期对生育阶段积温变化的响应[J]. 中国农业气象,2018,39(4):233-244.
- [64] 胡承霖. 安徽麦作学[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2009.
- [65] 陈翔,林涛,林非非,等. 黄淮麦区小麦倒春寒危害机理及防控措施研究进展[J]. 麦类作物学报,2020,40(2):243-250.
- [66] KIM J W, SHON J Y, LEE C K, et al. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature[J]. *Field Crops Research*,2011,122(3):207-213.
- [67] 张珊,邵宇航,石祖梁,等. 施镁对花后高温胁迫下小麦干物质积累转运和籽粒灌浆的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(7):963-969.
- [68] 王瑞霞,闫长生,张秀英,等. 春季低温对小麦产量和光合特性的影响[J]. 作物学报,2018,44(2):288-296.
- [69] 张溪荷,刘荣花,李祯,等. 低温胁迫对不同拔节进程小麦光合特性的影响[J]. 种业导刊,2019(7):6-12.
- [70] 马斯霜,白海波,惠建,等. CRISPR/Cas9 技术及其在水稻和小麦遗传改良中的应用综述[J]. 江苏农业科学,2019,47(20):29-33.
- [71] LIANG Z, CHEN K L, LI T D, et al. Efficient DNA-free genome editing of bread wheat using CRISPR/Cas9 ribonucleoprotein complexes[J]. *Nature Communications*,2017,8(1):429-440.
- [72] 陈祥兰,张雪峰,罗新兰,等. 东北玉米生长发育动态模拟模型研究[J]. 吉林农业大学学报,2012,34(3):242-247.
- [73] 张兵兵,吴航,杨璐,等. 基于归一化法模拟分析东北地区春玉米干物质积累对播期和品种的动态响应[J]. 中国农业气象,2019,40(6):357-367.

(下转第12页)

Symptoms, Causes, and Control Strategies of Wheat Freeze Injury in Huaibei Area of Jiangsu Province

WANG Yong-jun, LI Hai-jun, LI Li-li, PAN Li-yuan, LI Jing, HOU Fu, SUN Su-yang
(Jiangsu Xuhuai Area Huaiyin Institute of Agricultural Sciences, Huaian 223001, China)

Abstract: With the increasingly obvious trend of global warming, extreme weather events occur frequently. In recent years, wheat freeze injury has become a main climate disaster, threatening the security of wheat production. Huaibei area of Jiangsu Province lies in the transitional climate zone between north and south of Jiangsu. In Huaibei area, wheat is mainly grown after rice, and occasionally grown after soybean or maize. In wheat production, there are many sowing modes and wheat varieties, and its sowing dates span a long period of time. All these factors result in the complexity of wheat freeze injury. Aiming at alleviating the adverse impact of wheat freeze injury on wheat production in Huaibei area of Jiangsu Province, this paper summarizes main types and symptoms of wheat freeze injury in this area, analyzes its causes, and finally proposes corresponding preventive and control measures.

Key Words: Wheat; Freezing injury; Cause; Preventive strategy

(上接第7页)

Research Progress of Dry Matter Accumulation and Distribution Pattern in Wheat

KE Yuan-yuan¹, CHEN Xiang¹, NI Qian-qian¹, ZHANG Le-le¹, WEI Feng-zhen¹, LI Jin-cai^{1,2}
(1. College of Agriculture, Anhui Agricultural University / East China Crop Cultivation Scientific Observation Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei 230036, China; 2. Jiangsu Modern Crop Production Collaborative Innovation Center, Nanjing 210095, China)

Abstract: The accumulation and distribution of dry matter is an important indicator of wheat population growth. Based on the current status of pertinent research, this paper expounds the general laws of dry matter accumulation and distribution in wheat plants and the relationship between dry matter accumulation and yield. Besides, this paper also summarizes the effects of a number of factors on dry matter accumulation and distribution in wheat plants, which include the genetic factor genotype; the cultivation factors (sowing date and density, water supply, nitrogen fertilizer application); and the ecological factors (light and temperature). We also put forward some suggestions for the future research. First, we should make full use of molecular biology and other related technologies to promote the utilization of wheat germplasm resources and the breeding of new varieties. Second, by using phenomics and crop models, we need to deeply study the mechanisms of wheat dry matter accumulation, so as to realize the early diagnosis and quantitative regulation of wheat population. Finally, we should integrate multiple production technologies to realize the sustainable development of wheat production. By clarifying dry matter accumulation and distribution pattern in wheat, this paper provides a theoretical reference for the regulation of wheat population growth and lays foundations for achieving high and stable yield and high quality of wheat in China.

Key Words: Wheat; Dry matter; Cultivation factor; Ecological factor