

强筋冬小麦植株生育特性和产量 对减量供水响应特征研究



李向强, 肖凯*

河北农业大学农学院, 河北保定 071001

摘要: 明确优良强筋小麦品种及抗逆生理机制对于指导我国优质麦节水栽培具有重要实践意义。本研究针对河北平原区强筋麦生育特性和产量性状有待深入阐明现状, 探讨了 3 个具有示范潜力的强筋麦品种 (藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1) 光合特性、渗透调节物质 (脯氨酸和可溶性糖) 含量、氮素吸收累积、群体性状和产量对减量供水 (全生育期灌溉底墒水和拔节水 2 水) 的响应特征。结果表明, 与普通筋型对照 (石麦 22) 相比, 供试强筋麦品种光合参数 (Chl 含量、Pn 和 gs)、脯氨酸和可溶性糖含量、群体干质量和产量性状 (穗粒数、千粒重和产量) 的表现呈不同幅度下降, 但其各生育时期植株含氮量和单位面积穗数优于对照。依据供试强筋麦品种生理参数、群体性状和产量及蛋白产量表现优劣, 上述品种依次排序为藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1。其中, 藁优 5218 植株光合参数、渗透调节物质含量和产量表现与对照相近, 其籽粒蛋白产量高于对照。回归分析表明, 生育期间的脯氨酸合成酶关键基因 Δ^1 -吡咯啉-5-羧酸合成酶 (P5CS) 基因 *TaP5CS1* 表达水平与供试品种脯氨酸含量呈高度正相关, 各测试时期硝酸盐转运蛋白基因 *TaNRT2.1* 转录本丰度与同期植株氮累积量呈显著正相关。表明上述基因在调控节水栽培强筋麦和对照细胞渗透调节能力和植株氮素吸收累积中发挥着重要作用。藁优 5218 表现相对良好的产量和单位面积蛋白产量, 表明该强筋麦品种在节水栽培生产实践中具有重要应用前景。

关键词: 小麦; NF-YB 转录因子; 干旱胁迫; 基因表达; 生理参数

DOI: [10.57237/j.life.2022.01.003](https://doi.org/10.57237/j.life.2022.01.003)

Response Characteristics of Growth Properties and Yield of Strong-gluten Winter Wheat Upon the Water-saving Supply Condition

Xiangqiang Li, Kai Xiao*

College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

Abstract: Identification of the wheat cultivars with excellent strong-gluten property and the related stress resistance-associated physiological mechanism can provide practical basis for guiding the high-quality wheat cultivation under water-saving conditions. With an aim to understand the growth characteristics and yield traits of strong-gluten wheat in Hebei plain, this study investigated the photosynthetic characteristics, contents of osmotic regulatory substances (proline and soluble sugar),

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (216Z6401G); 国家自然科学基金项目 (31872869).

*通信作者: 肖凯, xiaokai@hebau.edu.cn

收稿日期: 2022-10-26; 接受日期: 2022-12-02; 在线出版日期: 2022-12-15

<http://www.lifescitech.org>

nitrogen uptake and accumulation, population characteristics and yield of strong-gluten wheat varieties (Gaoyou 5218, Shiyou 20 and Shishi Luan 02-1), three ones with demonstration potential, in response to reduction of water supply (irrigated prior to seed sowing and joint stage over the whole growth period). Results showed that compared with control (a common-gluten type cultivar Shimai 22), the photosynthetic parameters (chlorophyll content and Pn and gs), proline and soluble sugar contents, plant biomass, and the yield traits (grain number per spike, 1000 grain weight, and yield) were alleviated to different degrees. In contrast, the plant nitrogen content, population stem numbers, and spike amounts per planting unit area were shown to be superior to the control. According to the physiological parameters, population plant growth traits, yield and protein yield, the tested strong-gluten wheat cultivars were ranked in an order of Gaoyou 5218, Shiyou 20, and Shiluan 02-1, with the first one displaying the best on behaviors of photosynthetic parameters, osmotic regulation substance content and yield and to be similar to those shown in the control cultivar. Moreover, the grain protein yield of Gaoyou 5218 plants was higher than that of the control. Regression analysis showed that the expression level of Δ^1 -pyrrolin-5-carboxylate synthase (P5CS) gene *TaP5CS1* was highly positively correlated with the proline content of the tested varieties during growth stages, and the transcript abundance of nitrate transporter gene *TaNRT2.1* was significantly positively correlated with the nitrogen accumulative amount of plants during the same growth period. These results indicated that above genes played an important role in regulating the osmotic regulation ability and nitrogen uptake and accumulation of the strong-gluten and control cultivars under water-saving cultivation conditions. Gaoyou 5218 showed relatively elite yield and protein yield per unit area, indicating that this cultivar has an important application prospective for strong-gluten wheat cultivation.

Keywords: Wheat (*Triticum aestivum*); Strong Gluten and High-Quality; Water-saving Cultivation; Yield; Protein Yield

1 引言

小麦是世界上种植面积和产量最大的谷物之一[1], 维持较大冬小麦种植面积和产量水平在保障全球粮食安全中发挥着重要作用。近年来, 随着我国经济快速发展, 对优质作物产品的需求量日益增大。过去多年来, 我国学者围绕强筋优质冬小麦遗传改良和水肥运筹技术开展了大量研究。如先后选育出适合不同地区的强筋小麦品种(藁优 2018 和藁优 5218、周麦 24、津强 11、郑麦 366 等)[2-5], 明确了延缓强筋麦生育中后期植株早衰综合调控技术[6]、追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质调控效应[7]、氮钾养分供应对强筋麦叶片生理特性和籽粒品质性状的影响[8-9], 以及不同灌溉处理对强筋优质小麦籽粒产量及加工品质的调控效果[10-11]等。上述研究成果对于促进我国强筋优质小麦生产能力提升、改善我国居民膳食结构和生活水平发挥了重要的推动作用。

我国北方地区具有典型的季风型气候条件。在河北平原区, 冬小麦夏玉米周年两熟生产是该生态区的重要种植制度。其中, 冬小麦生长季节处于干旱少雨季节, 采用地下水灌溉是满足冬小麦水分供应进而维持生育期间植株良好生长发育和挖掘其高产潜力的有效途径[12-13]。但长期开采地下水导致该生态区水资

源紧缺, 且造成地下水资源匮乏程度呈日益加剧趋势[14-15]。因此, 筛选在节水栽培条件下具有水资源高效利用特性的抗旱丰产强筋优质冬小麦品种, 是保障河北平原以及我国北方地区强筋优质麦可持续发展的有效措施。

尽管前人围绕强筋麦品种选育和高产优质栽培的水肥调控技术已开展了较多研究[2-10], 但迄今有关河北平原区适合节水栽培的优良强筋优质麦品种鉴定和相关生物学基础仍有待进一步研究。基于此, 本研究以目前在河北平原区具有较大示范前景的 3 个强筋麦品种(藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1)和普通筋型品种(石麦 22, 对照)为材料, 对上述品种在节水灌溉(全生育期灌溉底墒水和拔节水 2 水)下生育期间植株光合特性、渗透物质合成、氮素吸收、植株群体性状和产量进行了比较分析。此外, 以供试小麦品种为材料, 对调控植株渗透物质脯氨酸生物合成、氮素吸收关键基因表达及其与脯氨酸含量及氮素吸收能力的关系进行了研究。本项研究旨在揭示节水栽培下强筋小麦品种产量形成及生物学基础, 为该生态区强筋优质麦可持续发展提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 试验材料与设计

试验于 2020-2021 和 2021-2022 小麦生长季在石家庄市藁城区河北农业大学试验基地进行。试验采用随机区组设计,供试小麦品种共 4 个,包括 1 个对照品种(普通筋型石麦 22)和 3 个在河北平原区具有示范推广前景的强筋麦品种,分别为藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1。小区面积 32 m² (长 8 m、宽 4 m),重复 3 次。两试验年度播期分别为 10 月 6 日和 10 月 7 日,依据各供试小麦品种千粒重和发芽率控制基本苗 300~315 万/hm²。种植形式为 15 cm 等行距。各试验小区均采用前期研究建立的节水灌溉模式,全生育期灌溉底墒水(75 mm)和拔节水(67.5 mm)2 水,每次灌水数量用水量仪控制。全生育期施纯氮(N)总量 225 kg/hm²,其中一半氮素和磷钾营养(60 kg/hm² P₂O₅和 90 kg/hm² K₂O)结合播前旋耕底施,另一半氮素拔节期结合灌水追施。生育期间化学除草和病虫害防治与强筋优质麦生产大田相同。

2.2 测定项目与方法

2.2.1 光合参数

在拔节、开花、灌浆中和蜡熟期,选取各处理小区植株上位代表性展开叶片,采用叶绿素仪(SPAD-502)测定叶绿素含量。同期,于晴天上午 9:00-11:00,采用光合作用测试系统(LiCOR-6200)测定对照品种(石麦 22)和各供试强筋优质麦品种上位展叶光合速率(Pn)、气孔导度(g_s)和胞间 CO₂ 浓度(Ci)。上述光合参数的具体测定方法均参照仪器使用说明进行。

2.2.2 渗透调节物质含量

在上述光合参数测试时期,各处理小区选取长势均匀的植株上位展开叶片,采集后在液氮中快速冷冻,置于-80℃超低温冰箱备用。采用碘基水杨酸-酸性茚三酮分光光度计比色法测定叶片样本脯氨酸含量[16];采用蒽酮分光光度计比色法测定叶片样本可溶性糖含量[17]。

2.2.3 植株含氮量和氮累积量

以测试光合参数各时期,采集不同处理小区植株样本,采用常规烘箱烘干法获取干样。另留取成熟期风干籽粒,用于籽粒含氮量测定。植株样本含氮量采用植物营养测定仪(ZWY01)测定,具体测定方法参照仪器使

用说明进行。依据各测试时期植株含氮量与群体干物重乘积,获得各测试时期单位面积植株氮累积量。

2.2.4 植株群体性状

在拔节、开花、灌浆中和成熟期,选取代表性样点和植株样本,测定对照品种和各供试强筋优质麦品种群体总茎数、叶面积指数(LAI)和群体干物重。其中,通过查数各处理小区 1 m² 代表性样点总茎数换算单位面积群体总茎数;通过用叶面积仪(YMJ-C 型)测定各处理小区 20 株代表性植株叶面积计算单株叶面积,进一步依据单株叶面积和基本苗数换算 LAI;将上述用于测定叶面积的植株剪掉根系,置于 105℃烘箱杀青 30 min,然后于 85℃烘至恒重,用电子天平称重。依据样本单株干物重和基本苗数换算群体干质量。

2.2.5 产量构成因素、产量和蛋白产量

成熟期,查数各处理小区 1 m² 样点穗数,进一步换算单位面积穗数。选取各处理小区 40 株代表性植株,查数总穗数和每穗粒数,计算平均穗粒数;将样本植株籽粒风干,从中查数 2 份 500 粒称重,换算籽粒千粒重。采用微型小麦收割机收获各处理小区 6 m² 样点籽粒,风干后称重,换算单位面积产量。通过籽粒含氮量和换算系数(6.25)乘积获得籽粒蛋白质含量,进一步依据籽粒蛋白质含量与产量乘积获得单位面积籽粒蛋白产量。

2.2.6 基因表达分析

在拔节、开花、灌浆中和蜡熟期,采集植株上位叶片样本,在液氮中速冻后于超低温冰箱保存,备用于检测前人鉴定的在调控脯氨酸合成中发挥关键作用的 Δ 1-吡咯啉-5-羧酸合成酶(P5CS)基因 *TaP5CS1* (GenBank 登录号: AB193551) [18]和调控小麦氮素吸收和转运的硝酸盐转运基因 *TaNRT2.1* (GenBank 登录号: LC278395) [19]转录本丰度。上述基因的转录本测定参照 Guo 等(2013)的实时定量 PCR(qRT-PCR)进行[20]。其中,用于扩增 *TaP5CS1* 的正向引物为 5'-GCACGTGGACCTGTGGGTGTTG,反向引物为 5'-GTTTTCGCGGAATCCTTACCACG;用于扩增 *TaNRT2.1* 的正向引物为 GGCCAAAAGTTTGCCGAGAACT,反向引物为 5'-GTACACCTTATTACAGCCGAT。以组成型表达的小麦种属基因 *Tatubulin* 作为上述基因转录本均一化的内标,用于扩增该内标基因的正向引物为 5'-AGAACACTGTTGTAAGGCTCAAC,反向引物为 5'-

GAGCTTTACTGCCTCGAACATGG。

2.3 数据计算及统计学分析

采用 Microsoft 中 Excel 工具计算进行数据均值、标准差、回归分析和统计学显著性测定。由于年度处理间测试性状表现规律一致, 数据为两个试验年度性状数据的均值。

3 结果与分析

3.1 供试品种生育期间光合特性

对照品种(石麦 22)和各强筋麦品种各生育时期

的光合参数见图 1。与对照相比, 强筋麦品种叶片 Chl 含量在拔节期和开花期的增高, 灌浆中期和蜡熟期降低; 光合速率(Pn)和气孔导度(gs)表现与 Chl 含量相似, 但不同时期各供试品种均低于对照; 胞间 CO₂ 浓度(Ci)在不同生育时期及品种间的表现呈与 Pn 和 gs 相反趋势(图 1)。与对照相比, 各强筋麦品种生育后期(灌浆中期和蜡熟期) Chl 含量、Pn 和 gs 明显降低, 而 Ci 增高, 表明该筋型品种生育后期光合器官的功能衰退较快。不同强筋麦品种相比, 依据生育期间光合参数表现, 依次排序为藁优 5218、石优 20 和师桀 02-1(图 1)。表明藁优 5218 在节水栽培条件下具有较强的光合碳同化能力。

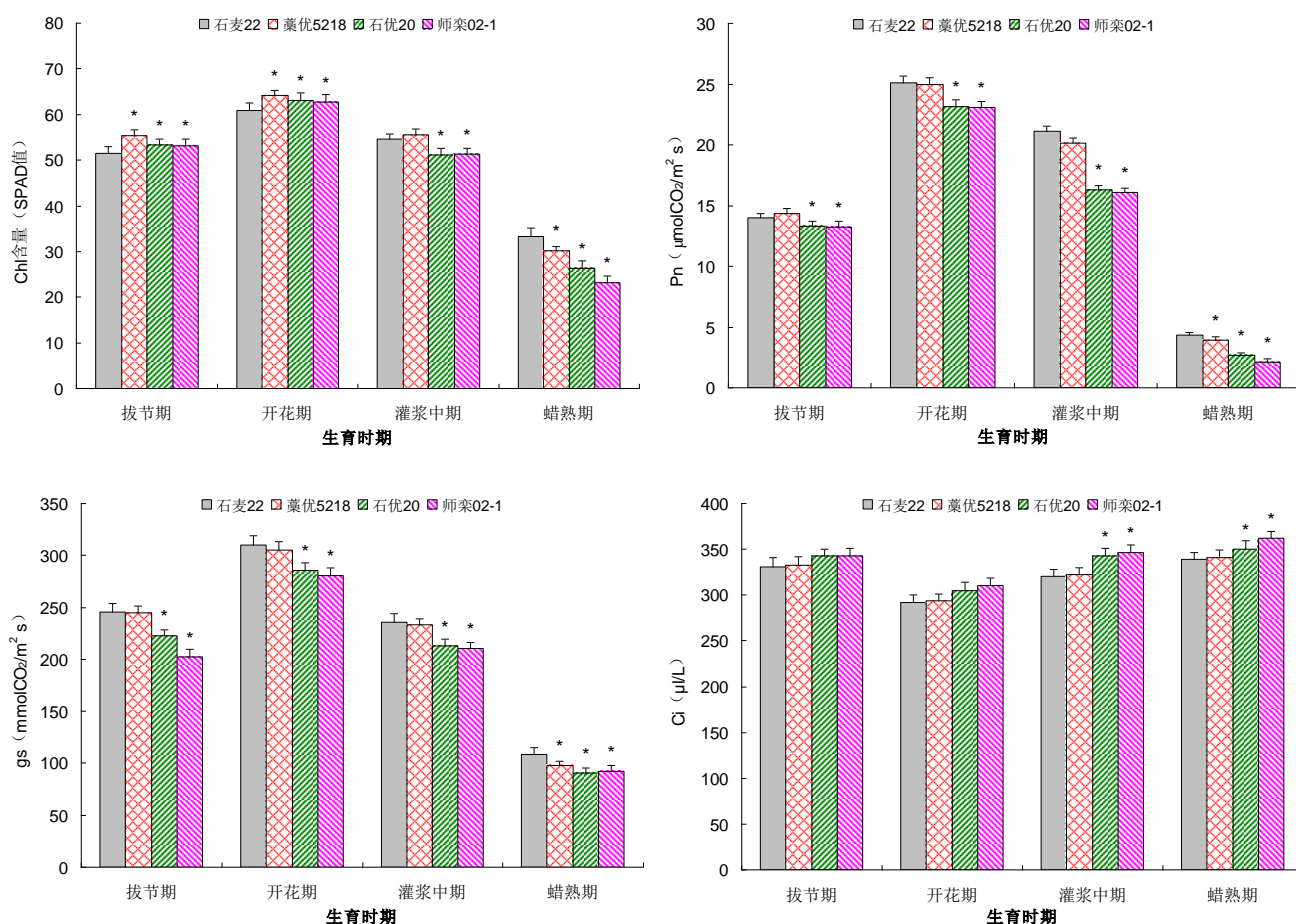


图 1 供试强筋麦品种不同生育时期光合参数

Figure 1 Photosynthetic parameters of the tested strong-gluten wheat cultivars at different growth stages

3.2 供试品种渗透植株调节物质含量

对照和各试强筋优质麦品种不同生育时期的植株

脯氨酸和可溶性糖含量见图 2。结果表明, 随着生育进程, 供试对照和强筋麦种植株的脯氨酸含量不断增高, 而可溶性糖含量表现为抛物线型变化, 在灌浆中期达到最大值。与对照相比, 各供试强筋麦品种不同

生育时期的脯氨酸含量和可溶性糖含量均呈不同程度的下降。各强筋麦品种相比, 各测试时期的植株脯氨酸含量和可溶性糖含量均以藁优 5218 最高, 石优 20 次之, 师乐 02-1 最低 (图 2)。表明节水栽培条件下, 不同强筋麦品种的细胞渗透调节物质合成代谢存在明显差异, 进而对植株的光合碳同化能力产生较大的影响。

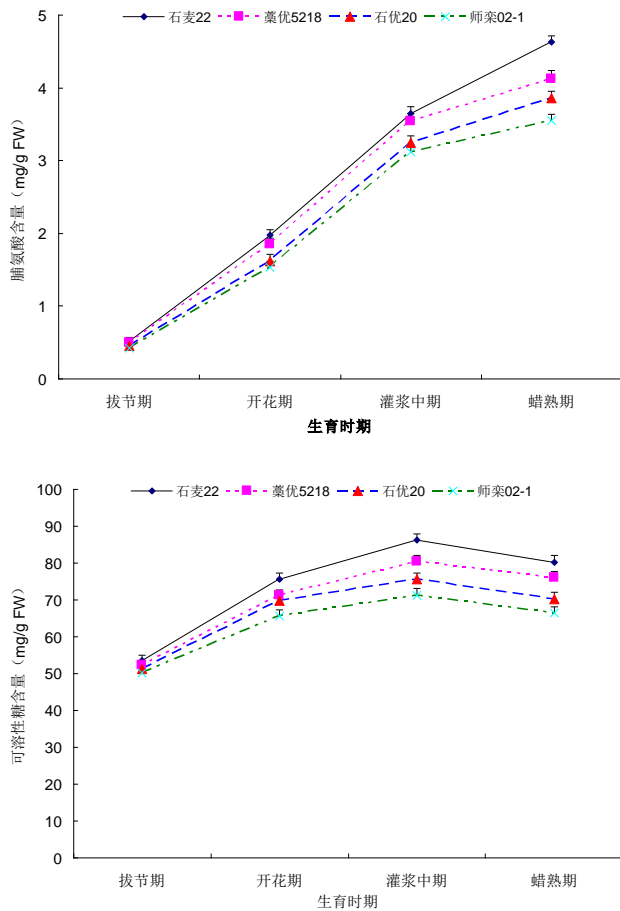


图 2 供试强筋麦品种不同生育时期脯氨酸和可溶性糖含量

Figure 2 Proline and soluble contents of the tested strong-gluten wheat cultivars at different growth stages

3.3 供试品种氮素吸收累积特性

对照和各强筋优质麦品种不同生育时期的植株含氮量和氮累积量见图 3。与对照相比, 供试强筋麦品种各测试时期的植株含氮含量均显著增高 (较对照增幅 6.08~27.99%), 表明强筋麦品种生育期间细胞内氮素浓度高于普通筋型品种。供试品种各生育时期植株氮累积量表现为, 与对照相比, 藁优 5218 植株氮累积量增多, 该强筋麦品种各生育时期的氮累积量均显著高

于对照品种。石优 20 各测试时期的植株氮累积量与对照表现相近, 师乐 02-1 在生育中期 (拔节期和开花期) 与对照相近, 而生育中后期 (灌浆中期和蜡熟期) 植株氮累积量与对照相比显著减少 (图 3)。表明与对照品种相比, 不同强筋型小麦品种生育期间植株氮素积累能力存在较大差异。藁优 5218 较其他品种具有较强的氮素吸收和累积能力, 为其节水栽培下植株相对良好生长发育、产量形成和品质改良奠定了良好基础。

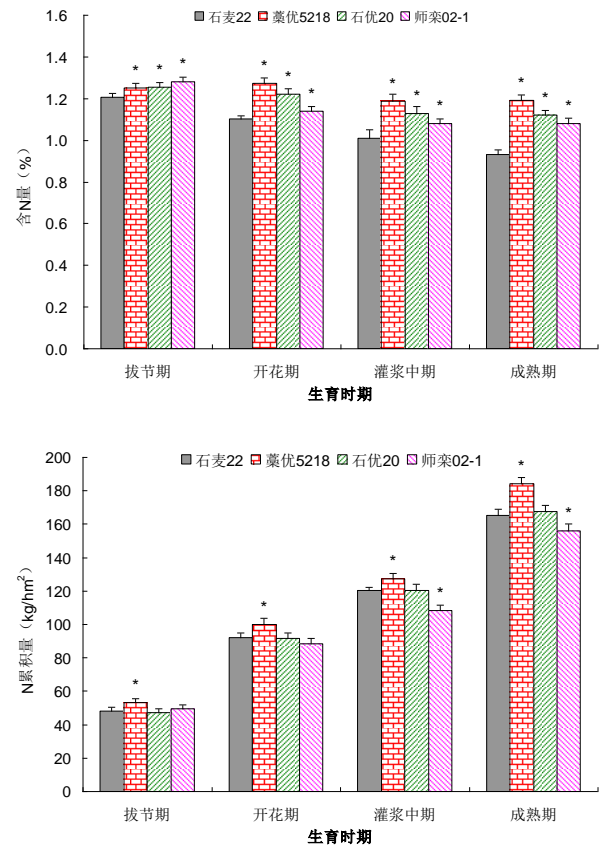


图 3 供试强筋优质麦品种不同生育时期植株含氮量和氮累积量

Figure 3 Contents and accumulative amounts of nitrogen of the strong-gluten wheat cultivars at different growth stages

3.4 供试品种植株群体性状

对照和各供试强筋麦品种不同生育时期 (拔节、开花、灌浆中和蜡熟期) 的群体总茎数、叶面积指数 (LAI) 和群体干质量见图 4。与对照相比, 各强筋麦品种不同生育时期的群体总茎数均显著增多, 表明供试强筋麦品种植株具有更强的单株分蘖及成穗能力。不同生育时期供试品种 LAI 表现为, 在拔节期至灌浆中期, 除开花期藁优 5218 显著高于对照外, LAI 在上述时期的品种间差异较小; 但在蜡熟期, 依据各品种

LAI 值大小排序，依次为对照、藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1。与对照品种相比，不同测试时期供试强筋麦品种的单位面积植株干质量均明显降低，表明强筋麦品种在节水栽培下的植株干物质生产潜力低于普通筋型对照品种；各强筋麦相比，依据生育期间群体干

质量高低排序，依次为藁优 5218、石优 20 和师栾 02-1（图 4）。表明供试品种群体建成和光合物质生产能力与个体光合碳同化和细胞渗透物质生化合成代谢具有紧密的联系。

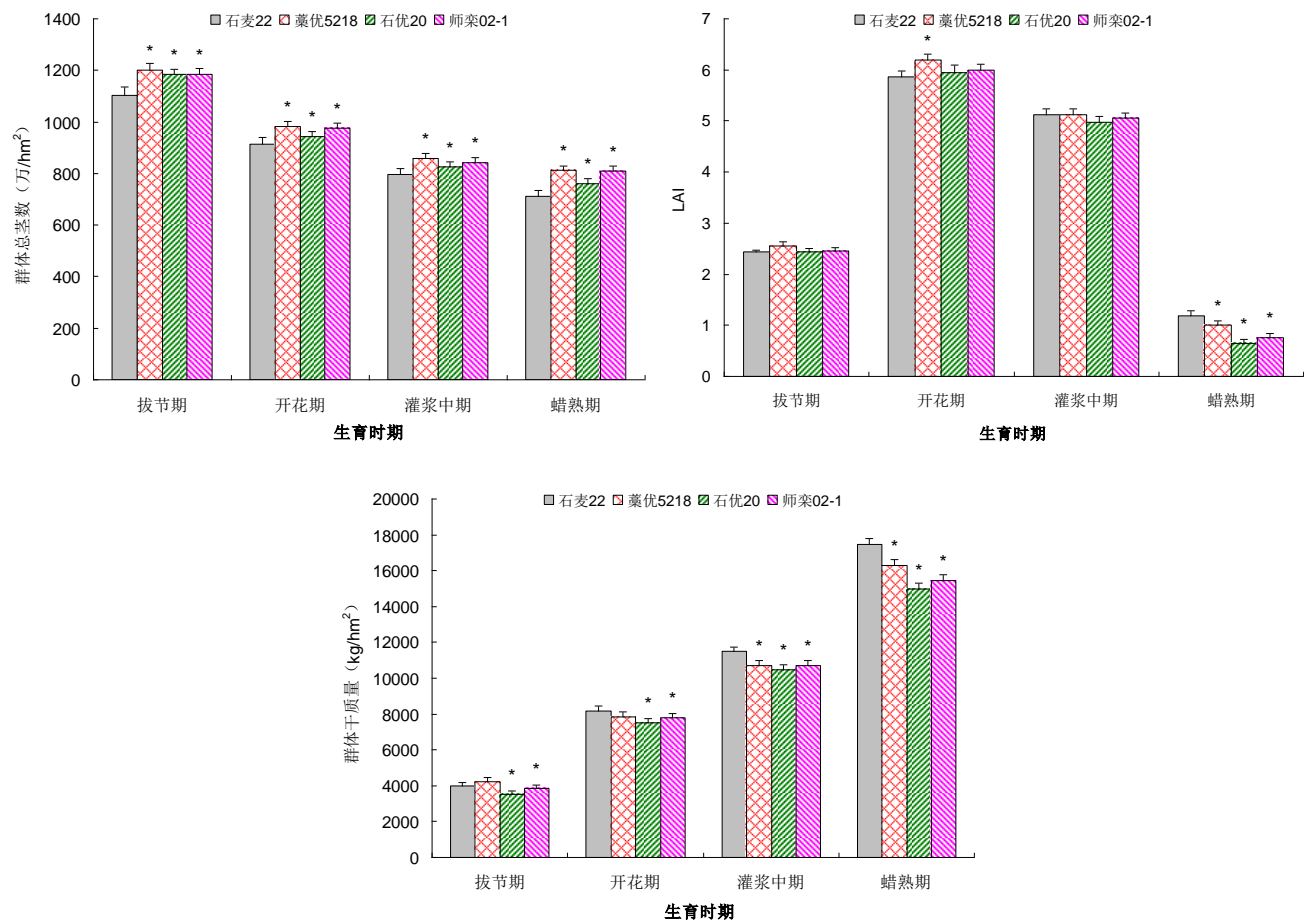


图 4 供试强筋优质麦品种不同生育时期植株群体性状

Figure 4 Population traits of the tested strong-gluten wheat cultivars at different growth stages

3.5 供试品种产量和品种性状

对照和各供试强筋优质麦品种成熟期产量构成因素、产量、籽粒蛋白含量和单位面积籽粒蛋白产量见表 1。与对照相比，各强筋优质麦品种单位面积穗数和籽粒蛋白含量较对照品种显著提高。其中，单位面积穗数较对照提高 7.88-15.51%，籽粒蛋白含量较对照提高 14.90-17.22%；各供试强筋优质麦品种的穗粒数、千粒重与对照品种相比则相反，均显著低于对照，其中穗粒数降低 4.21-14.75%，千粒重降低 4.83-6.33%，产

量降低 3.45-20.41%。与对照相比，藁优 5218 的籽粒蛋白产量显著增加，但石优 20 和师栾 02-1 的籽粒蛋白产量低于对照（表 1）。结果表明，节水栽培条件下，各供试强筋优质麦品种在单位面积植株群体成穗能力和籽粒蛋白含量优于普通筋型对照品种，但单穗结实粒数、粒重和单位面积产量形成能力劣于对照。强筋麦品种中藁优 5218 具有较高产量和单位面积蛋白产量，表明该品种在今后节水栽培生产中具有重要应用前景。

表

1 供试强筋优质麦品种的产量构成因素和产量

Table 1 Yield components and yields of the tested strong-gluten wheat cultivars

品种	穗数 (万/hm ²)	穗粒数 (个)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	籽粒蛋白含量 (%)	籽粒蛋白产量 (kg/hm ²)
济麦 22	715.40c	33.22a	42.01a	10110.30a	14.23b	1438.69b
藁优 5218	826.35a	31.82b	39.98b	9761.25b	16.35a	1595.96a
石优 20	771.80b	30.22b	39.35b	8046.00c	16.57a	1333.22c
师乐 02-1	810.90a	28.32c	39.44b	8151.60d	16.68a	1359.68c

3.6 供试品种 *TaP5CS1* 和 *TaNRT2.1* 表达特征及其与脯氨酸及氮素累积关系

不同生育时期对照和供试强筋麦种植株叶片 *TaP5CS1* 和 *TaNRT2.1* 表达特征见图 5。结果表明，在拔节至蜡熟期，各品种 *TaP5CS1* 的表达水平均呈随着

生育进程不断增高；而 *TaNRT2.1* 的表达水平则随着生育进程不断降低。依据各测试时期 *TaP5CS1* 的转录本丰度高低，品种间排序依次为对照、藁优 5218、石优 20 和师乐 02-1，以对照植株中该基因表达最强；*TaNRT2.1* 的表达水平则依据高低依次排序为藁优 5218、石优 20、师乐 02-1 和对照，以对照植株中该基因表达强大最弱（图 6）。

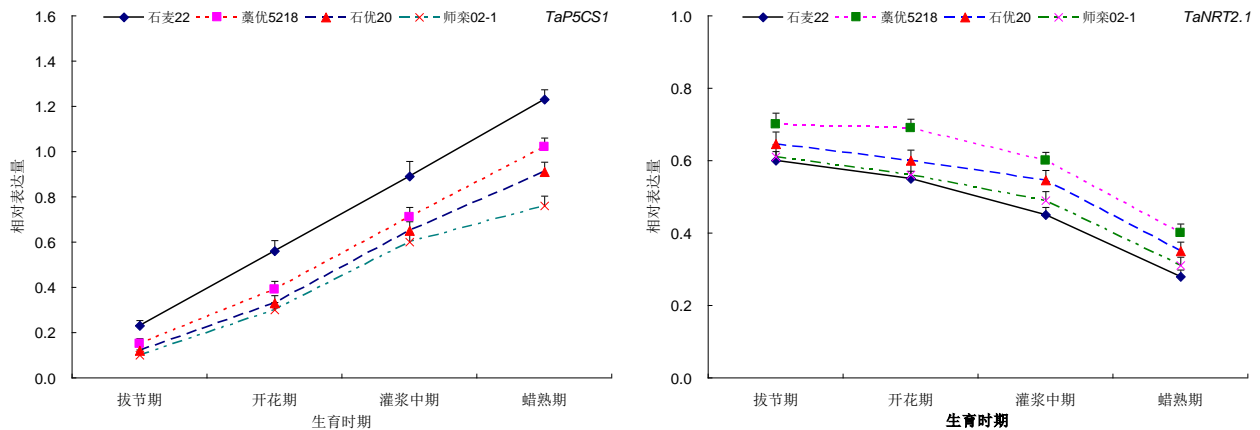


图 5 供试强筋优质麦品种不同生育时期 *TaP5CS1* 和 *TaNRT2.1* 转录本丰度

Figure 5 Transcripts abundance of the tested strong-gluten wheat cultivars at different growth stages

供试品种不同测试时期的 *TaP5CS1* 转录本丰度与植株脯氨酸含量的回归分析结果见图 6。结果表明，植株脯氨酸含量与该基因的表达水平呈高度相关，表明该基因在调控节水栽培强筋麦细胞渗透调节物质合成和调节能力中发挥着重要功能。对供试品种各生育时期的植株 *TaNRT2.1* 转录本丰度与同期植株氮累积量的回归分析结果见图 7。在拔节、开花、灌浆中和蜡熟期，供试小麦品种的单位面积植株氮累积量均与同期的 *TaNRT2.1* 表达水平呈高度正相关。表明该基因表达增强对于改善植株氮素吸收和累积过程中发挥重要作用。

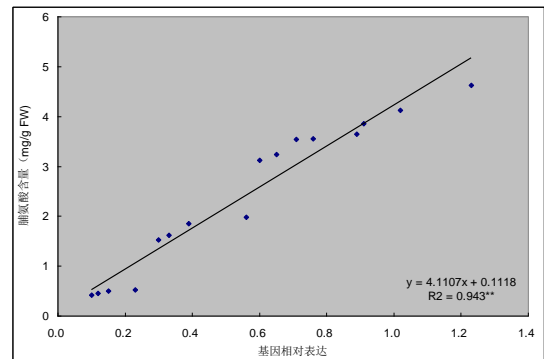
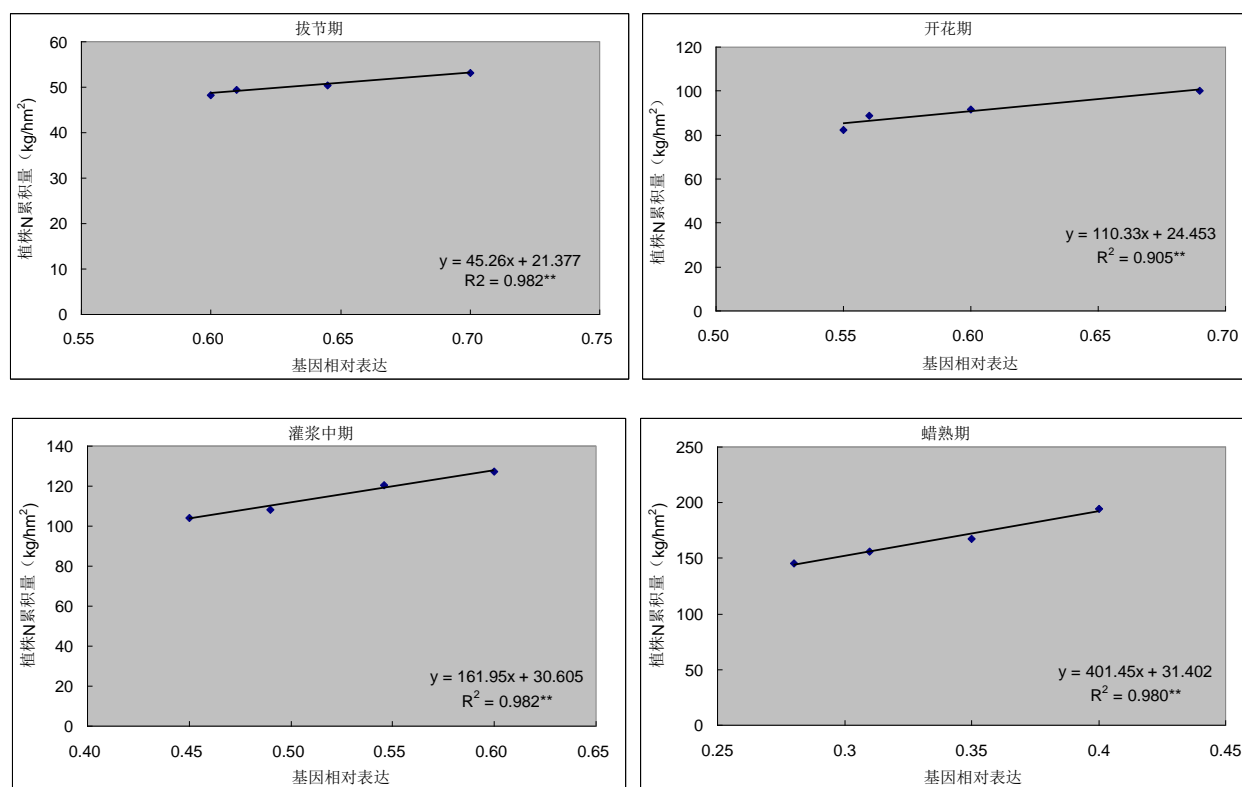


图 6 植株脯氨酸含量与 *TaP5CS1* 转录本丰度的回归关系

Figure 6 Regression relations between plant proline content and the *TaP5CS1* transcripts abundance

图 7 不同生育时期植株氮累积量与 *TaNRT2.1* 转录本丰度的回归关系Figure 7 Regression relations between plant N accumulative amounts and the *TaNRT2.1* transcripts abundance at different growth stages

4 讨论

维持良好的光合碳同化能力和细胞渗透物质调节能力是改善节水栽培冬小麦群体发育、植株干物质生产和产量潜力的重要生理基础[21]。本研究对 3 个在河北平原区具有示范推广前景的强筋优质麦品种节水栽培条件下生育期间的的光合特性和细胞渗透调节物质含量研究表明,与普通筋型品种(石麦 22)相比,各供试强筋优质麦品种生育期间、尤其生育后期光合参数(Chl 含量、Pn 和 gs)和渗透调节物质(脯氨酸含量和可溶性糖含量)均表现不同程度下降,表明供试强筋麦品种在节水栽培条件下干旱相关生理过程表现劣于供试对照品种。这与对照品种石麦 22 归属与抗旱节水品种、具有在干旱及节水栽培下良好的生理特征及产量潜力有关[22]。对供试强筋优质麦不同生育时期光合参数和细胞渗透物质含量的测试结果表明,不同品种间上述生理参数表现存在较大差异,表现为藁优 5218 的表现最佳,其次为石优 20,以师栾 02-1 的表现较差。上述不同品种间的生理参数表现特征表现较大

差异,表明强筋麦品种对于水分减量供应的响应特征有所不同,进而对节水栽培下的植株产量和品质性状产生重要影响。

与普通筋型冬小麦相比,强筋优质麦品种含氮量和籽粒蛋白含量通常表现增高趋势[23-24]。本研究也取得了类似结果,表现为与对照品种相比,供试强筋麦品种各生育时期的植株含氮量和籽粒含氮量均显著提高。此外,藁优 5218 的各生育时期植株氮累积量和成熟期籽粒蛋白产量也显著高于对照(石麦 22)和其他 2 个强筋麦品种(石优 20 和师栾 02-1)。因此,减量水分供应条件下,藁优 5218 具有较强的植株氮素吸收和积累能力,是其改善植株体内蛋白质合成代谢以及光合色素叶绿素以及各种生化酶类物质(脯氨酸和可溶性糖生化合成)、进而增强植株光合碳同化和细胞渗透调节能力的重要生理基础。

强筋优质冬小麦籽粒蛋白质形成和积累与普通筋型小麦品种相比主要集中在籽粒灌浆前中期[25]。强筋优质麦品种籽粒蛋白积累与其前期快速氮素吸收和含氮化合物生化合成、后期相对库容较少碳水化合物积累密切相关[26]。同时,籽粒灌浆期间籽粒库容向叶片

等营养器官高强度调运氮素等无机营养也是改善籽粒产品优质的重要因素[27]。因此, 强筋优质麦品种成熟期通常具有较多单位面积穗数, 补充其穗粒数少和千粒重低对产量的限制。本研究表明, 与对照品种石麦 22 相比, 节水栽培条件下, 供试强筋麦品种各生育时期均维持较大的群体总茎数, 成熟期的单位面积穗数多于对照, 但其穗粒数和千粒重与对照品种降低。表明节水栽培强筋优质麦通过调控群体建成维持生育期间较大群体和群体成穗能力, 一定程度上补偿其穗粒数少和粒重低对产量形成能力的限制。前人研究表明, 缩小行距优化植株行株距配置, 通过改善群体水平上生育中后期植株水平及空间分布, 能有效改善节水栽培下冬小麦群体发育、中后期冠层光截获和产量形成能力[28]。因此, 优化种植形式对于改善强筋优质麦品种产量形成能力可能具有良好效果。有关适宜种植形式改善强筋产量和品质形成能力的效果有待进一步研究。

P5CS 是调控植株重要渗透调节物质脯氨酸生物合成的关键酶, *TaP5CS1* 表达水平在调控节水处理下植株脯氨酸含量中发挥重要作用[18]。此外, 硝酸转运蛋白 (*TaNRT2.1*) 通过介导根系对介质中氮素吸收及不同组织器官间氮素转运, 在增强植株抵御干旱和低氮胁迫中发挥重要生物学功能[19]。本研究对供试对照和强筋麦品种不同生育时期的 *TaP5CS1* 和 *TaNRT2.1* 的转录本丰度进行检测及其分别与脯氨酸含量和植株氮累积量的相关性进行了分析。结果证实, 各品种的 *TaP5CS1* 表达水平与其脯氨酸含量表现相符, 而 *TaNRT2.1* 的转录本丰度特征与各自相应时期的植株氮累积量一致。回归分析表明, *TaP5CS1* 表达水平与植株脯氨酸含量呈高度正相关, 而 *TaNRT2.1* 转录本丰度与同期植株氮累积量呈显著正相关。表明上述基因表达对节水栽培强筋麦细胞渗透调节物质合成和植株氮素吸收累积具有重要影响, 可作为评价强筋麦节水栽培细胞渗透物质合成和氮素吸收能力的分子评价指标。

5 结论

节水栽培强筋麦品种较普通筋型对照 (石麦 22) 光合能力、渗透调节物质含量、群体干质量和产量性状呈不同幅度下降, 但植株含氮量和穗数优于对照。强筋麦品种藁优 5218 节水栽培下表现与对照品种光合参数、渗透调节物质含量和产量相似, 但其籽粒蛋白

产量显著高于对照。脯氨酸合成酶关键基因 $\Delta 1$ -吡咯啉-5-羧酸合成酶 (P5CS) 基因 *TaP5CS1* 表达水平与脯氨酸含高度正相关, 硝酸盐转运蛋白基因 *TaNRT2.1* 表达水平与同期植株氮累积量显著正相关, 上述基因在调控强筋麦细胞渗透调节能力和氮素吸收中发挥重要作用。藁优 5218 良好产量和蛋白产量表明其在节水强筋优质麦栽培中具有重要应用前景。

参考文献

- [1] 叶志标, 李文娟. 小麦空间布局演变及驱动因素分析的研究现状 [J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40 (03): 158-165.
- [2] 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.
- [3] 黄峰, 殷贵鸿, 韩玉林, 等. 主要栽培措施对强筋小麦周麦 24 号产量及品质特性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2013, 33 (04): 732-735.
- [4] 梁丹, 王从磊, 刘丹, 等. 优质强筋春小麦新品种—津强 11 号 [J]. 麦类作物学报, 2019, 39 (06): 761.
- [5] 何盛莲, 雷振生, 吴政卿, 等. 优质强筋小麦郑麦 366 精确定量施氮技术研究 [J]. 西南农业学报, 2011, 24 (04): 1377-1380.
- [6] 李向东, 季书勤, 吕凤荣, 等. 中后期综合调节措施对强筋小麦早衰的防控效果 [J]. 麦类作物学报, 2011, 31 (06): 1141-1147.
- [7] 王晓英, 贺明荣. 追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应 [J]. 麦类作物学报, 2013, 33 (04): 711-715.
- [8] 王喜枝, 王立河, 曹雯梅, 等. 豫东潮土氮钾营养对强筋小麦旗叶生理特性和籽粒品质的影响 [J]. 麦类作物学报, 2010, 30 (06): 1090-1096.
- [9] 王美芳, 雷振生, 吴政卿, 等. 环境变异及施肥措施对强筋小麦品质性状的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (21): 164-168.
- [10] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 不同灌水处理对强筋小麦加工品质的影响 [J]. 核农学报, 2010, 24 (06): 1232-1237.
- [11] 李豪圣, 刘爱峰, 肖永贵, 等. 灌溉对优质强筋小麦生育后期生理特性及产量的影响 [J]. 节水灌溉, 2010 (07): 1-5.
- [12] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34 (09): 2367-2377.

- [13] 汪顺生, 高传昌, 王兴, 等. 不同灌溉方式下冬小麦耗水规律及产量的试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32 (04): 11-14.
- [14] 张红梅. 河北省地下水超采综合治理农业灌溉水源置换存在问题及对策建议 [J]. 河北水利, 2022 (03): 28.
- [15] 田言亮, 张光辉, 王茜, 等. 黄淮海平原灌溉农业对地下水依赖程度与保障能力 [J]. 地球学报, 2016, 37 (03): 257-265.
- [16] Ábrahám E, Hourton-Cabassa C, Erdei L, Szabados L. 2010. Methods for determination of proline in plants. In: Sunkar R, ed., *Plant Stress Tolerance: Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology*. Humana Press, New York, NY. pp. 317–331.
- [17] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, Rebers P A, Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28, 350–356.
- [18] Zhang Y, Zhao Y, Li T, et al. *TaPYL4*, an ABA receptor gene of wheat, positively regulates plant drought adaptation through modulating the osmotic stress-associated processes. *BMC Plant Biology*, 2022 22: 423.
- [19] Zhang Y, Zhao Y, Sun L et al.. The N uptake-associated physiological processes at late growth stage in wheat (*Triticum aestivum*) under N deprivation combined with deficit irrigation condition. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 164: 160-172.
- [20] Guo C, Zhao X, Liu X, et al. 2013. Function of wheat phosphate transporter gene *TaPHT2;1* in Pi translocation and plant growth regulation under replete and limited Pi supply conditions. *Planta*, 237, 1163-1178.
- [21] 晁漫宁, 史新月, 张健龙, 等. 灌浆期持续干旱对小麦光合、抗氧化酶活性、籽粒产量和品质的影响 [J]. 麦类作物学报, 2020, 40 (04): 494-502.
- [22] 龙素霞, 李芳芳, 石书亚, 赵颖佳, 肖 凯. 氮磷钾配施对小麦植株养分吸收利用和产量的影响. 作物杂志, 2018, (6): 96-102.
- [23] 李秀绒, 柴永峰, 赵智勇, 等. 运旱号强筋抗旱丰产系列小麦品种选育研究 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (12): 29-35.
- [24] 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 不同灌水处理对强筋小麦籽粒产量和蛋白质组分含量的影响 [J]. 作物学报, 2007 (11): 1828-1833.
- [25] 王东, 于振文. 施氮水平对强筋小麦氮素同化及籽粒蛋白质组分积累的影响 [J]. 水土保持学报, 2007 (05): 147-150.
- [26] 杨延兵, 高荣岐, 尹燕桦, 等. 不同品质类型小麦籽粒游离氨基酸、蛋白质及其组分的动态变化 [J]. 麦类作物学报, 2007 (05): 864-869.
- [27] 黄蓉, 马亚琴, 李毅博, 等. 花后干旱条件下冬小麦顺序和非顺序衰老同化物积累及转运特性 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (01): 7-13.
- [28] 龙素霞, 赵颖佳, 李芳芳, 等. 缩行种植形式对冬小麦群体性状、养分吸收和产量形成能力的影响 [J]. 华北农学报, 2020, 35 (5): 178-184.