

网络出版时间:2025-06-26

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250625.1627.009

基于 Meta 分析主要栽培措施对弱筋小麦 产量和籽粒蛋白含量的影响

朱夏童¹, 戚柳¹, 迟凯祥¹, 刘馨怡¹, 刘威¹, 任进¹, 陈翔¹, 李金才^{1,2}, 郑宝强¹

(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:播期、施氮量及密度是调控弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的有效栽培措施,但在长江中下游地区尚缺乏整合定量研究。本研究采用 Meta 分析的方法定量分析了 2002—2022 年长江中下游地区主要栽培措施对弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的调控效应。播期、施氮量和密度的对照组分别为 10 月 20 日—11 月 6 日、210~240 kg·hm⁻²、180×10⁴~240×10⁴ 株·hm⁻²。Meta 分析结果表明,与对照组相比,当播期推迟 14~21 d 时,弱筋小麦产量显著降低,平均降幅为 9.73%,而籽粒蛋白含量显著增加,平均增幅为 3.87%;当施氮量减少 30~240 kg·hm⁻² 时,产量和籽粒蛋白含量均显著降低,平均降幅分别为 6.42%~51.72%、6.63%~19.13%;当密度增加 30×10⁴~120×10⁴ 株·hm⁻² 时,产量显著增加,平均增幅为 4.39%~7.11%,而籽粒蛋白含量显著降低,平均降幅为 1.16%~3.70%。明确了不同播期、施氮量、密度下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量之间的关系,发现将其分别控制在 10 月 24 日—10 月 31 日、172~186 kg·hm⁻²、293×10⁴~360×10⁴ 株·hm⁻² 时,可在保障产量>6 500 kg·hm⁻² 的同时籽粒蛋白含量<11.5%,实现量质协调;此时植株群体干物质积累量于开花期和成熟期分别维持在 9.7~11.3、17.5~20.1 t·hm⁻²,而开花期单茎、茎、叶、穗氮含量分别维持在 11.7、5.6、30.7、15.8 mg·g⁻¹ 以内。

关键词:弱筋小麦;产量;籽粒蛋白含量;栽培措施;Meta 分析

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1245-13

Effects of Main Cultivation Practices on Grain Yield and Protein Content of Weak Gluten Wheat Based on Meta-Analysis

ZHU Xiatong¹, QI Liu¹, CHI Kaixiang¹, LIU Xinyi¹, LIU Wei¹, REN Jin¹,
CHEN Xiang¹, LI Jincal^{1,2}, ZHENG Baoqiang¹

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University/Crop Cultivation Science Observatory in East China of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei, Anhui 230036, China; 2. Collaborative Innovation Center of Modern Crop Production in Jiangsu, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: Sowing date, nitrogen rate and plant density are effective cultivation practices to regulate grain yield (GY) and protein content (GPC) in weak gluten wheat. In this study, a meta-analysis was performed on the effects of these main cultivation practices on GY and GPG of weak gluten wheat in the Middle and Lower reaches of Yangtze River using the existing literature data from 2002 to 2022. The control (CK) was selected from 20 October to 6 November for sowing date, from 210 to 240 kg·hm⁻² for nitrogen rate, and from 180×10⁴ to 240×10⁴ plants·hm⁻² for plant density, respectively. The meta-analysis showed that when the sowing date was delayed by 14–21 days, the GY of weak

收稿日期:2024-11-26 修回日期:2025-03-17

基金项目:国家自然科学基金青年项目(32401954);安徽省自然科学基金青年项目(2308085QC90);安徽农业大学引进人才资助项目(rc312302)

第一作者 E-mail: ZXT200074@stu.ahau.edu.cn(朱夏童)

通讯作者 E-mail: zhengbaoqiang@ahau.edu.cn(郑宝强)

gluten wheat was significantly reduced by 9.73%, while the GPC was increased by 3.87%; when the nitrogen rate was reduced by 30–240 kg · hm⁻², the GY and GPC was significantly simultaneously decreased by 6.42%–51.72% and 6.63%–19.13%, respectively; when the plant density was increased by 30×10⁴–120×10⁴ plants · hm⁻², the GY was significantly improved by 4.39%–7.11%, while the GPC was decreased by 1.16%–3.70%, compared with the CK. Furthermore, the relationship between GY and GPC of weak gluten wheat was analyzed under different cultivation practices mentioned above in this region. The qualified grain quality (GPC<11.5%) while maintaining optimum yield (GY>6 500 kg · hm⁻²) could be achieved with the sowing date from October 24 to October 31, the nitrogen rate from 172 to 186 kg · hm⁻², and the plant density from 293×10⁴ to 360×10⁴ plants · hm⁻². Correspondingly, the dry matter accumulation of weak gluten wheat ranged between 9.7 and 11.3 t · hm⁻² at anthesis as well as 17.5 and 20.1 t · hm⁻² at maturity, while the nitrogen content of single stem, stem, leaf, and ear at anthesis is maintained within 11.7, 5.6, 30.7, and 15.8 mg · g⁻¹.

Keywords: Weak gluten wheat; Yield; Grain protein content; Cultivation practices; Meta-analysis

弱筋小麦籽粒蛋白含量低,面粉筋力弱,是制作饼干、糕点等食品的主要原料^[1]。中国烘焙食品商业协会统计指出,2004–2024 年中国饼干年消费量将由 105 万吨增至 1 440 万吨,平均年增长率超过 18.0%,现已成为世界第二大饼干消费国。但近年来中国弱筋小麦的品质达标率不足 1%,无法满足饼干、蛋糕等烘焙食品的加工需求,存在着巨大的产需缺口^[2]。产量和籽粒蛋白含量是小麦生产的两个主要目标,前者决定了其生产力,后者则决定了其最终用途和烘焙品质^[3-4]。前人研究表明,小麦产量和籽粒蛋白含量对施氮量的响应存在以下 3 种关系:(1)当施氮量较低时,籽粒蛋白含量随产量增加而有所下降,称为“稀释阶段”;(2)当施氮量进一步提高,籽粒蛋白含量和产量同步上升,称为“同步阶段”;(3)当施氮量达到较高水平时,籽粒蛋白含量随产量降低而增加,被称为“浓缩阶段”^[5]。长江中下游是中国弱筋小麦最优势产区,但在生产中产量与籽粒蛋白含量常处于“同步阶段”,导致量质协调难度大。大量研究已证实播期、施氮量及密度是调控弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的有效栽培措施^[6-12]。但由于这些独立试验的空间尺度过小、时间跨度较短等原因,利用单个栽培因子调控弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的研究结果并不完全一致甚至完全相反,在长江中下游地区尚缺乏整合定量研究。

Meta 分析是运用整合与定量研究的方法综合分析和评估同一主题下多项独立研究结果,现已被应用到作物相关研究中^[13-17]。前人利用 Meta 分析对不同时空尺度下耕作方式、气候变化、

肥料施用等对小麦产量和籽粒蛋白含量的影响进行了定量研究。郑侃等^[18]定量评估了近 30 年中国北方地区深松对小麦产量的影响,发现深松旋耕和深松免耕的平均产量较旋耕、免耕提高了 10.2%左右,且持续深松免耕 2~3 年的增产效果优于 4 年及以上。孔祥飞等^[19]整合分析了 1999–2019 年气候变化对中国小麦籽粒蛋白含量的影响,得出增温显著提高了籽粒蛋白含量,而 CO₂ 浓度升高降低了籽粒蛋白含量,但降水量变化无显著影响。Ishfaq 等^[20]定量研究了 1972–2022 年肥料施用对全球粮食作物营养品质的影响,发现施用化肥使粮食作物平均增产了 28.2%~33.7%,其中小麦等禾谷类作物平均籽粒蛋白含量同步提高了 9.7%~13.4%。以上研究结果表明,针对某个科学问题进行 Meta 分析可通过加大时空尺度等方式提高研究结论的科学性与准确性。

本研究采用 Meta 分析的方法定量研究了 2002–2022 年长江中下游地区主要栽培措施(播期、施氮量、密度)对弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的调控效应,分析了不同栽培措施下产量与籽粒蛋白含量的关系及协调区间,并进一步明确了实现量质协调的植株个体与群体参数指标范围,以为弱筋小麦高产优质栽培提供科学依据与技术指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源与筛选

本研究选择中国知网 (<http://www.cnki.net/>) 和 Web of Science (<http://apps.webof->

knowledge.com/) 等数据库,以弱筋小麦 (soft wheat/ weak gluten wheat)、播期 (sowing date/ sowing time/ date of seeding/ seeding time)、施氮量 (nitrogen rate/ nitrogen/ N)、密度 (plant density/ planting density/ sowing rate)、产量 (yield)、籽粒蛋白含量 (grain protein content) 等为关键词,检索了 2002 年 1 月至 2022 年 10 月已公开发表的所有相关文献,并且纳入该分析的研究必须符合以下标准:

(1) 试验地点位属中国长江中下游地区,大田试验且重复 3 次以上;

(2) 试验处理至少包含播期、施氮量、密度中 1 个控制变量,且同一试验中至少包含 1 对对照组与试验组,其他试验条件完全一致;

(3) 试验结果中至少包含产量(穗数、穗粒数、千粒重)和籽粒蛋白含量中 1 个响应变量;

(4) 不同文章中重复出现的试验数据只统计 1 次。

使用上述标准,本研究共筛选出 117 篇文献,并提取到 1 175 条数据对可用于 Meta 分析。其中播期文献 20 篇,135 条数据对;施氮量文献 50 篇,563 条数据对;密度文献 47 篇,477 条数据对。所有文献共涉及弱筋小麦品种 18 个,其中江苏省选育品种 13 个(扬麦 9 号、扬麦 13、扬麦 15、扬麦 18、扬麦 20、扬麦 22、宁麦 9 号、宁麦 13 号、宁麦 18、扬辐麦二号、扬辐麦 5 号、生选 6 号和建麦 1 号),安徽省选育品种 2 个(皖麦 48 号和皖西麦 0638),湖北省选育品种 2 个(鄂麦 251 和鄂麦 580),河南省选育品种仅 1 个(郑麦 103)。不同栽培措施下试验点分布情况如图 1 所示,其中播期共 20 个(江苏省 15 个、安徽省 4 个、湖北省 1 个),施氮量共 33 个(江苏省 22 个、安徽省 8 个、湖北省 3 个),密度共 34 个(江苏省 19 个、湖北省 9 个、安徽省 6 个)。

1.2 数据分类与研究方法

如表 1 所示,为定量分析主要栽培措施对长江中下游地区弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的调控效应,本研究将播期、施氮量及密度划分为不同等级,并选用目前弱筋小麦生产中的适宜播期(10 月 20 日—11 月 6 日)、常规施氮量(210~240 kg · hm⁻²)和常规密度(180 × 10⁴ ~ 240 × 10⁴ 株 · hm⁻²)作为对照组(CK)。

1.2.1 标准差计算

若文献中产量和籽粒蛋白含量数据有标准差时,直接使用;当无标准差但有标准误时,可使用以下公式进行转换:

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

其中 SD 是标准差 (standard deviation); SE 是标准误 (standard error); n 表示样本量。若文献中没有给出 SD 和 SE 数值,则利用变异系数 (coefficient of variation, CV) 估算 SD 值^[21]。

1.2.2 效应值计算

在 Meta 分析中,以响应比 R 的自然对数 $\ln R$ 作为效应值^[22],计算公式为:

$$\ln R = \ln(Z_e / Z_c) = \ln Z_e - \ln Z_c \quad (2)$$

其中 Z_e 和 Z_c 分别代表试验组和对照组指标均值。此外,采用方程计算方差 (v)、权重 (ω)、总体平均效应值 ($\ln RR$)、 $\ln RR$ 的 95% 置信区间 (confidence interval, CI),公式如下:

$$v = \frac{SD_e^2}{n_e X_e} + \frac{SD_c^2}{n_c X_c} \quad (3)$$

$$\omega = 1/v \quad (4)$$

$$\ln RR = \frac{\sum_{i=1}^m (\ln R_i \times \omega_i)}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (5)$$

$$S_{\ln RR} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \omega_i}} \quad (6)$$

$$95\% CI = \ln RR \pm 1.96 S_{\ln RR} \quad (7)$$

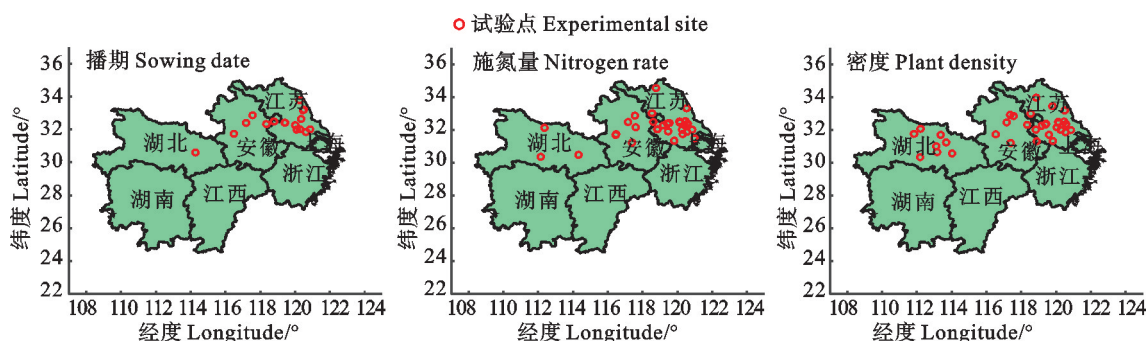


图 1 试验点分布情况
Fig. 1 Distribution of experimental sites in this study

表 1 各栽培措施不同等级划分标准

Table 1 Standard for grade classification of different cultivation practices

播期 Sowing date/d	施氮量 Nitrogen rate/(kg · hm ⁻²)	密度 Plant density/(×10 ⁴ plants · hm ⁻²)
-21 ≤ S < -14	-240 ≤ N < -210	-120 ≤ D < -90
-14 ≤ S < -7	-210 ≤ N < -180	-90 ≤ D < -60
-7 ≤ S < 0	-180 ≤ N < -150	-60 ≤ D < -30
CK	-150 ≤ N < -120	-30 ≤ D < 0
0 < S ≤ 7	-120 ≤ N < -90	CK
7 < S ≤ 14	-90 ≤ N < -60	0 < D ≤ 30
14 < S ≤ 21	-60 ≤ N < -30	30 < D ≤ 60
21 < S ≤ 28	-30 ≤ N < 0	60 < D ≤ 90
28 < S ≤ 35	CK	90 < D ≤ 120
/	0 < N ≤ 30	120 < D ≤ 150
/	30 < N ≤ 60	150 < D ≤ 180
/	60 < N ≤ 90	180 < D ≤ 210
/	90 < N ≤ 120	210 < D ≤ 240

S、N、D:播期、施氮量、密度与对照之间的差值。对照(CK)播期范围为 10 月 20 日-11 月 6 日,施氮量范围为 210~240 kg · hm⁻²,密度范围为 180×10⁴~240×10⁴株 · hm⁻²。正负值代表不同等级较对照增减值。下表同。

S, N, and D indicate the relative variation of sowing date, nitrogen rate, and plant density in relation to CK, respectively. The range of control(CK) is from October 20 to November 6 for the sowing date, from 210 to 240 kg · hm⁻² for the nitrogen rate, and from 180×10⁴ to 240×10⁴ plants · hm⁻² for the plant density. Positive and negative values represent the increase or decrease of different grades compared with the control. The same in below.

其中 n_e 和 n_c 分别为试验组和对照组样本量; SD_e 和 SD_c 分别为试验组和对照组标准差; X_e 和 X_c 分别为试验组和对照组平均值, m 为指标个数。

为更好地反映弱筋小麦试验组产量和籽粒蛋白含量较对照组的相对增减情况,将效应值转化为相对变化率 W , 计算公式为:

$$W = [\exp(\ln R) - 1] \times 100\% \quad (8)$$

若 W 的 95% 置信区间不包含 0, 说明该栽培措施对产量和籽粒蛋白含量调控效应显著 ($P < 0.05$); 反之则不显著 [23]。

1.2.3 异质性检验

数据异质性通过 Q 检验和 I^2 检验, 如 $P < 0.05$ 、 $I^2 > 50\%$, 则各栽培措施下纳入的研究结果之间存在异质性。由于本研究中纳入的数据源于独立试验, 不同试验间气候、土壤、品种等方面存在差异, 因此采用随机效应模型以减少异质性的影响 [24]。

1.2.4 偏倚性检验

通过漏斗图和失安全数进行稳健性检验。若漏斗图对称且失安全数大于 $5k + 10$ (k 为案例个数), 则表明结果不受发表偏倚性的影响, 结果可靠。

1.2.5 信息增益分析

信息增益是一种衡量特征和类别之间关系的

重要指标, 用来表示特征 A(播期、施氮量、密度)的信息使得类别 d (产量、籽粒蛋白含量)的信息不确定减少的程度, 该值越大表示特征变量越重要 [25]。

信息熵的计算公式:

$$H(d) = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

条件熵的计算公式:

$$H(d|A) = \sum_{i \in A} P_i \cdot H(d|A_i) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

信息增益 = 信息熵 - 条件熵:

$$\text{Gain}(d, A) = H(d) - H(d|A) \quad (11)$$

1.2.6 弱筋小麦籽粒蛋白含量标准选择

中国现行有效的弱筋小麦标准有两个, GB/T 17893-1999 和 GB/T 17320-2013 中对籽粒蛋白含量(干基)的要求分别为 $\leq 11.5\%$ 和 $< 12.5\%$ 。为降低生产中弱筋小麦籽粒蛋白含量超标的风险并改善饼干、糕点等食品的烘焙品质, 本研究选用更为严格的籽粒蛋白含量 $\leq 11.5\%$ 作为标准进行分析。若文献中只有籽粒全氮含量, 则将全氮含量乘以氮-蛋白质转换系数 5.7 [NBSC(中国国家标准局)1982 年] 计算得出籽粒蛋白含量。

1.3 数据处理方法

采用 Excel 2016 进行数据收集与分类; Mat lab 2019b 绘制地图; Meta win 2.1 分析数据并计

算响应比;SPSS Statistics 26 进行数据差异显著性检验;Stata 17 绘制森林图;Origin 2021 拟合方程,分析不同栽培措施下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量的关系。

2 结果与分析

2.1 不同栽培措施下弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的变异

表 2 列出了 2002—2022 年播期、施氮量和密度下弱筋小麦产量及籽粒蛋白含量的变异情况。在不同播期、施氮量和密度下,产量的变化范围分别为 4 620.0~10 039.5、1 316.0~10 441.0、

2 397.0~10 441.0 kg · hm⁻²;穗数的变化范围分别为 322.4 × 10⁴~728.3 × 10⁴、(159.0 × 10⁴~696.4 × 10⁴、222.0 × 10⁴~728.3 × 10⁴ · hm⁻²;穗粒数的变化范围分别为 28.7~49.9、16.0~52.1、21.3~53.1;千粒重的变化范围分别为 31.8~47.6、30.0~52.8、30.5~50.3 g。产量及构成因素的变异系数均表现为施氮量>密度>播期,且在同一栽培措施下产量构成因素的变异系数均表现为穗数>穗粒数>千粒重;而籽粒蛋白含量的变化范围为 10.6%~14.2%、8.5%~15.5%、8.5%~14.9%,其变异系数也表现为施氮量>密度>播期。

表 2 不同栽培措施下弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的变异情况

Table 2 Variation of grain yield and protein content of weak gluten wheat under different cultivation practices

栽培措施 Cultivation practice	指标 Index	数据条数 Nb of data	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	变异系数 CV/%
播期 Sowing date	穗数 Ear number/(×10 ⁴ · hm ⁻²)	131	322.4	728.3	515.7	15.4
	穗粒数 Grain number per ear	131	28.7	49.9	37.9	9.1
	千粒重 1 000-grain weight/g	131	31.8	47.6	39.8	7.3
	产量 Yield/(kg · hm ⁻²)	135	4 620.0	10 039.5	6 988.3	15.4
	籽粒蛋白含量 Grain protein content/%	53	10.6	14.2	12.1	8.0
施氮量 Nitrogen rate	穗数 Ear number/(×10 ⁴ · hm ⁻²)	541	159.0	696.4	432.3	23.0
	穗粒数 Grain number per ear	541	16.0	52.1	36.2	16.9
	千粒重 1 000-grain weight/g	555	30.0	52.8	40.3	8.3
	产量 Yield/(kg · hm ⁻²)	563	1 316.0	10 441.0	6 037.2	31.0
	籽粒蛋白含量 Grain protein content/%	478	8.5	15.5	11.7	12.5
密度 Plant density	穗数 Ear number/(×10 ⁴ · hm ⁻²)	471	222.0	728.3	477.2	17.9
	穗粒数 Grain number per ear	471	21.3	53.1	37.7	15.5
	千粒重 1 000-grain weight/g	471	30.5	50.3	39.8	8.0
	产量 Yield/(kg · hm ⁻²)	477	2 397.0	10 441.0	6 707.8	22.7
	籽粒蛋白含量 Grain protein content/%	306	8.5	14.9	11.6	10.7

2.2 主要栽培措施对弱筋小麦产量及构成因素的调控效应

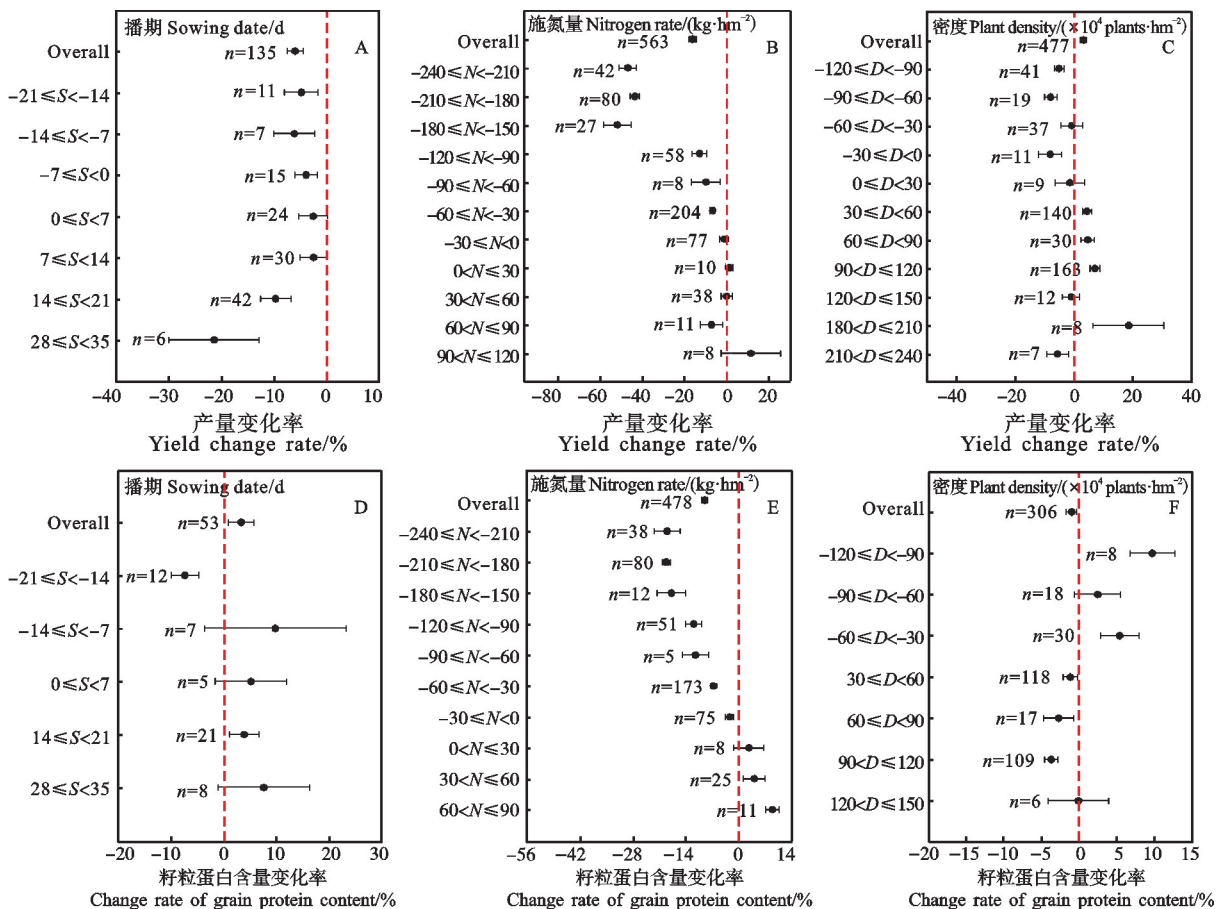
播期、施氮量和密度对弱筋小麦产量的调控效应均达到显著水平(图 2A~图 2C)。与对照播期(10 月 20 日—11 月 6 日)、施氮量(210~

240 kg · hm⁻²)、密度(180 × 10⁴~240 × 10⁴ 株 · hm⁻²)相比,当播期提早 0~21 d 时,产量显著降低,平均降幅范围为 3.97%~4.87%;而推迟 14~21 d 和 28~35 d 时,产量降低显著,平均降幅分别为 9.73%和 21.43%。当施氮量减少 30

~240 kg · hm⁻² 时,产量显著降低,平均降幅范围为 6.42%~51.72%;而增加 60~90 kg · hm⁻² 时,产量显著降低,平均降幅为 7.02%。当密度减少 0~30 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,产量显著降低,平均降幅为 8.12%;减少 60 × 10⁴~120 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,产量平均降幅范围为 5.17%~8.03%;而增加 30 × 10⁴~120 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,产量显著增加,平均增幅范围为 4.39%~7.11%;增加 180 × 10⁴~210 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,产量继续增加,平均增幅高达 18.63%;但增加 210 × 10⁴~240 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,产量显著降低,平均降幅为 5.71%。进一步分析产量构成发现,晚播主要通过减少穗数降低了产量,减氮后产量降低则是由于穗数和穗粒数共同减少导致的,而增密主要通过增加穗数实现了增产(图 3)。

2.3 主要栽培措施对弱筋小麦籽粒蛋白含量的调控效应

播期、施氮量和密度对弱筋小麦籽粒蛋白含量的调控效应均达到显著水平(图 2D~图 2F)。与对照相比,当播期提早 14~21 d 时,籽粒蛋白含量显著降低,平均降幅为 7.41%;而推迟 14~21 d 时,籽粒蛋白含量显著增加,平均增幅为 3.87%。当施氮量减少 30~240 kg · hm⁻² 时,籽粒蛋白含量显著降低,平均降幅范围为 6.63%~19.13%;而增加 30~90 kg · hm⁻² 时,籽粒蛋白含量显著增加,平均增幅范围为 4.25%~9.09%。当密度减少 30 × 10⁴~60 × 10⁴ 株 · hm⁻² 和 90 × 10⁴~120 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,籽粒蛋白含量显著增加,平均增幅分别为 5.41%和 9.73%;而增加 30 × 10⁴~120 × 10⁴ 株 · hm⁻² 时,籽粒蛋白含量显著降低,平均降幅范围为 1.16%~3.70%。



S、N、D:播期、施氮量、密度与对照之间的差值。产量变化率或籽粒蛋白含量变化率代表处理与对照的差值较对照的变化。点和误差线分别代表平均效应值及 95% 的置信区间(CI)。平均效应值小于 0 代表负效应,大于 0 代表正效应,且当 CI 与 0 不相交时代表该效应显著。*n* 代表不同栽培措施等级下的样本量。下同。

S, N, and D indicate the relative variation of sowing date, nitrogen rate, and plant density in relation to CK, respectively. The change rate of grain yield or protein content represent the difference between V_T and V_C following division by V_C. The dots represent the mean effect sizes with 95% confidence intervals(CI). Mean values < 0 indicate a negative effect, mean values > 0 indicate a positive effect, if 95% CIs did not overlap 0 indicate significant effect. The numbers (*n*) indicate the data records for each group. The same in figure 3.

图 2 主要栽培措施不同等级下弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的变化

Fig. 2 Changes in grain yield and protein content of weak gluten wheat with different main cultivation practices grade

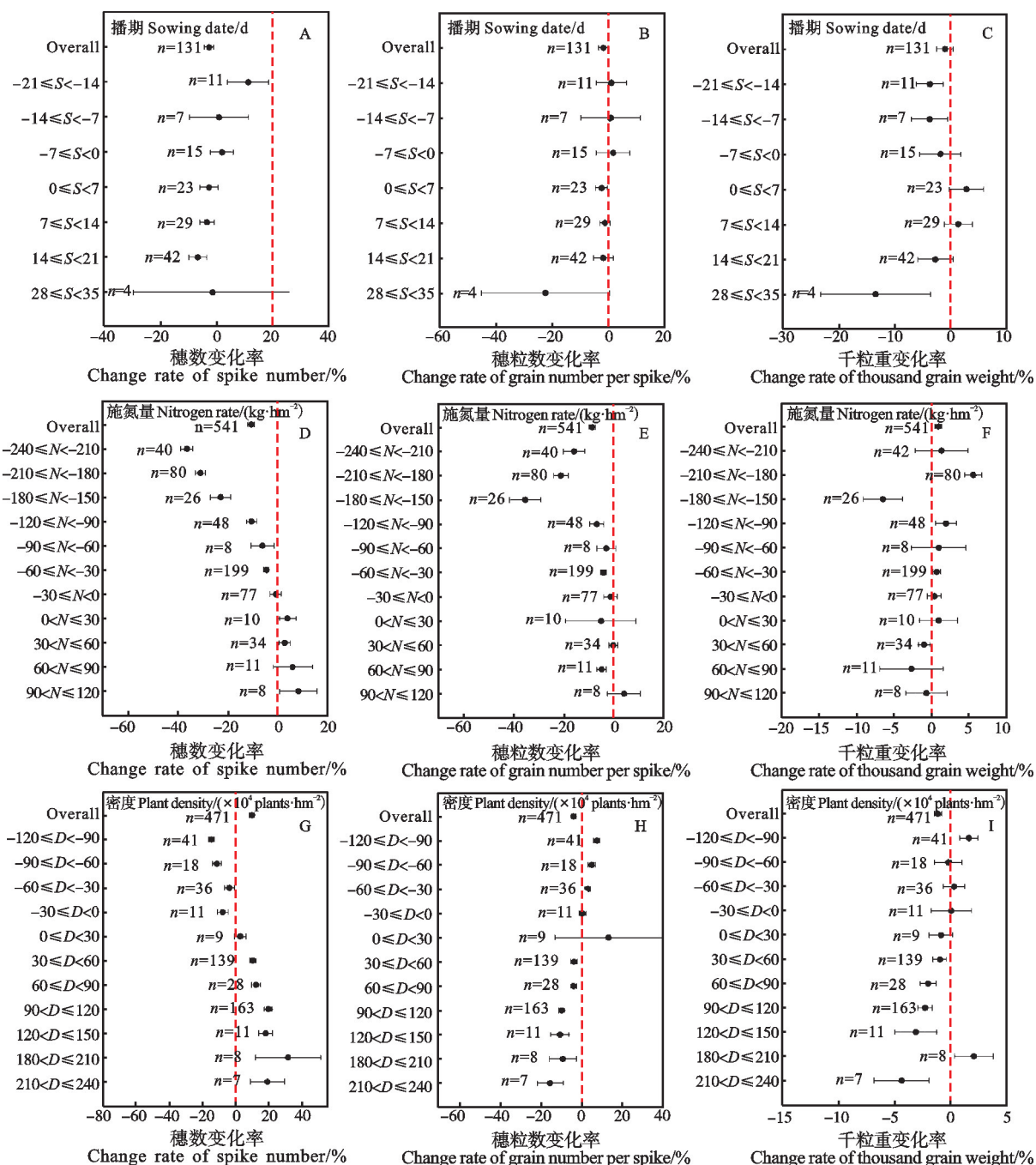


图 3 主要栽培措施不同等级下弱筋小麦产量构成因素的变化

Fig. 3 Changes in yield components of weak gluten wheat with different main cultivation practices grade

2.4 主要栽培措施下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量的关系及其协调区间

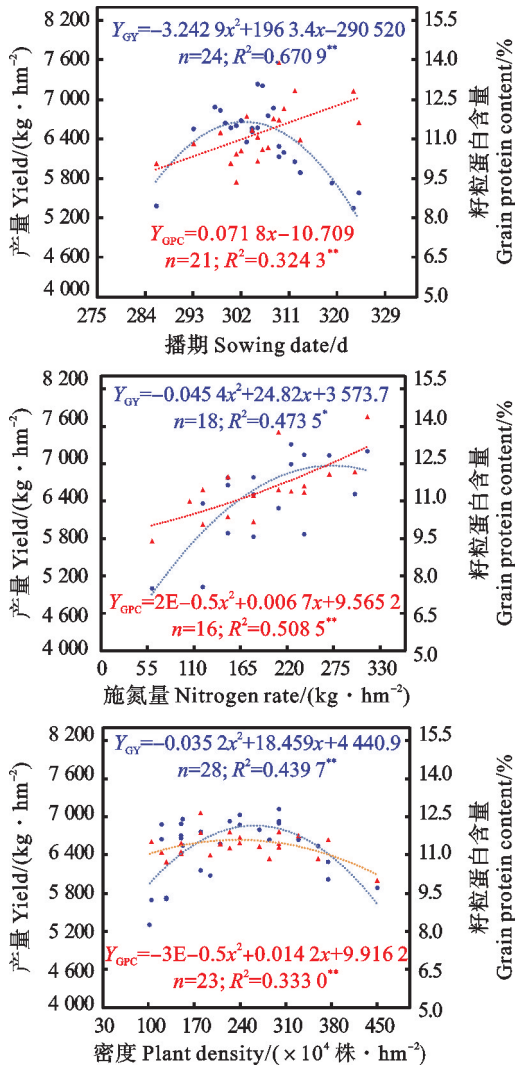
为明确播期、施氮量及密度下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量之间的关系,本研究将同一栽培措施等级下各省份的产量、籽粒蛋白含量数据进行平均(图 4),以提高拟合方程的准确性。

当播期范围为 10 月 14 日—11 月 21 日时,弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量对播期推迟的响应呈现以下 2 种关系:当播期在 10 月 31 日前,产量

和籽粒蛋白含量同步增加;在 10 月 31 日后,产量降低而籽粒蛋白含量增加。通过回归方程计算可知,播期在 10 月 24 日—10 月 31 日范围内,弱筋小麦产量可达 6 500~6 663 kg · hm⁻²,对应籽粒蛋白含量为 10.54%~11.05%。

当施氮量范围为 60~330 kg · hm⁻² 时,弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量对施氮量增加的响应呈现出以下 2 种关系:当施氮量 < 273 kg · hm⁻² 时,产量和籽粒蛋白含量同步增加;而 > 273 kg ·

hm⁻² 时,产量降低而籽粒蛋白含量增加。通过回归方程计算可知,施氮量在 172~186 kg·hm⁻² 范围内,弱筋小麦产量可达 6 500~6 620 kg·hm⁻²,对应籽粒蛋白含量为 11.32%~11.50%。



产量和籽粒蛋白含量数据为同一栽培措施水平的各省份平均值, n 为样本量。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。下同。

The data of grain yield and protein content are the mean values of all experimental sites in each province under the same cultivation practice, and the numbers (n) represent the sample sizes. * and ** indicate the significant level of 5% and 1%, respectively. The same in figures 5-6.

图 4 主要栽培措施下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量的关系
Fig. 4 Relationship between grain yield and protein content of weak gluten wheat with main cultivation practices

当密度范围为 $102 \times 10^4 \sim 450 \times 10^4$ 株·hm⁻² 时,弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量对密度增加的响应呈现出以下 3 种关系:当密度 $< 237 \times 10^4$ 株·hm⁻² 时,产量和籽粒蛋白含量同步增加;在 $237 \times 10^4 \sim 262 \times 10^4$ 株·hm⁻² 范围内,产量增加

而籽粒蛋白含量降低;而 $> 262 \times 10^4$ 株·hm⁻² 时,产量和籽粒蛋白含量同步降低。通过回归方程计算可知,密度在 $293 \times 10^4 \sim 360 \times 10^4$ 株·hm⁻² 范围时,弱筋小麦产量可达 6 500~6 828 kg·hm⁻²,对应籽粒蛋白含量为 11.14%~11.50%。

2.5 主要栽培措施下弱筋小麦产量与植株干物质积累量的关系

在播期下,弱筋小麦产量在 5 328.2~5 812.5 kg·hm⁻² 范围时,随开花期干物质积累量增加而降低,随成熟期干物质积累量增加而提高;在 5 812.5~8 660.1 kg·hm⁻² 范围时,随开花期、成熟期干物质积累量增加均提高(图 5)。在施氮量

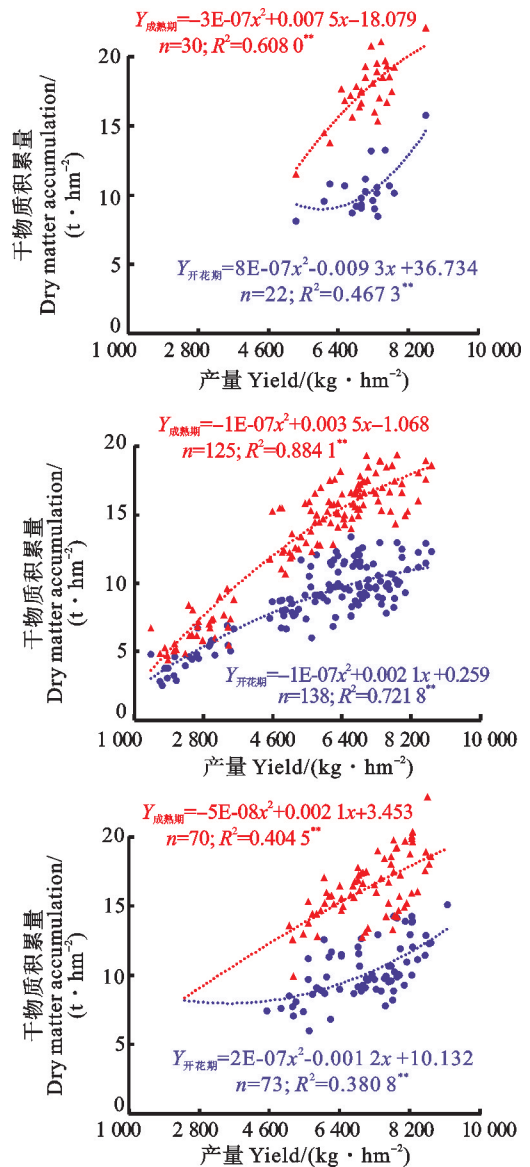


图 5 弱筋小麦产量与干物质积累量的关系

Fig. 5 Relationship between grain yield and dry matter accumulation of weak gluten wheat

下, 产量在 $1\ 425.7\sim 8\ 732.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围时, 随开花期、成熟期干物质积累量增加均提高。在密度下, 产量在 $2\ 425.0\sim 3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围时, 随开花期干物质积累量增加而降低, 随成熟期干物质积累量增加而提高; 在 $3\ 000\sim 9\ 148.9\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围时, 随开花期、成熟期干物质积累量增加均提高。通过回归方程计算可知, 当弱筋小麦产量 $>6\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 植株群体干物质积累

量于开花期、成熟期分别维持在 $9.7\sim 11.3$ 、 $17.5\sim 20.1\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.6 主要栽培措施下弱筋小麦籽粒蛋白含量与植株氮含量的关系

在施氮量和密度下弱筋小麦开花期植株单茎、茎、叶、穗氮含量数据均满足 Meta 分析要求, 但在播期下植株氮含量数据较少, 故未进行分析。如图 6 所示, 在施氮量和密度下, 弱筋小麦籽粒蛋

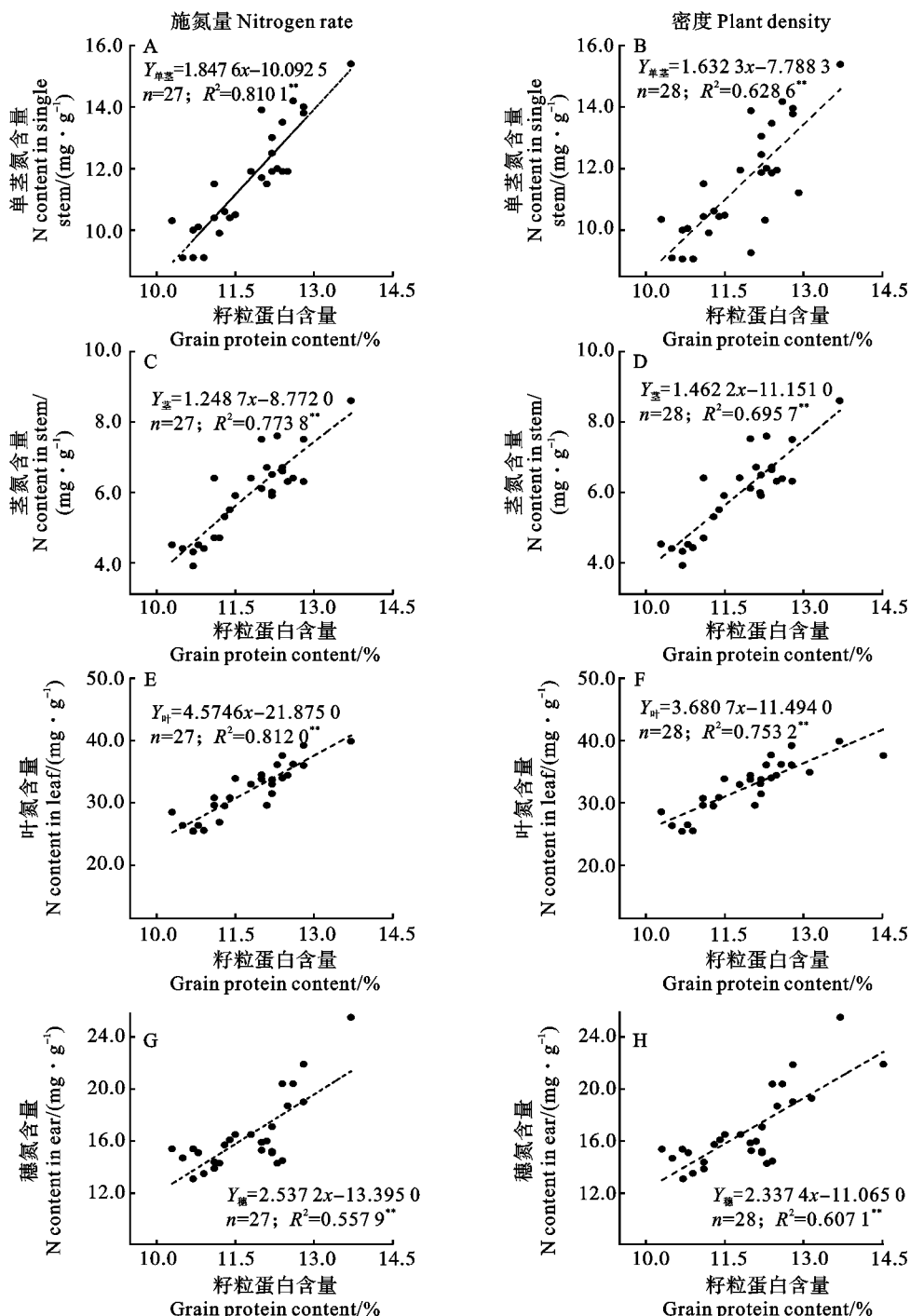


图 6 弱筋小麦籽粒蛋白含量与植株氮含量的关系

Fig. 6 Relationship between grain protein content and plant nitrogen content of weak gluten wheat

白含量与开花期植株单茎、茎、叶、穗氮含量均呈显著正相关关系;由回归方程斜率可知,籽粒蛋白含量对叶片氮含量的变化响应最敏感,其次为穗,而茎最不敏感。通过回归方程计算可知,当弱筋小麦籽粒蛋白含量 $<11.5\%$ 时,开花期植株单茎、茎、叶、穗氮含量分别维持在 $11.7、5.6、30.7、15.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以内。

2.7 主要栽培措施对弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的重要性分析

信息增益是特征 A (播期、施氮量、密度) 使类别 d (产量及构成因素、籽粒蛋白含量) 的信息不确定性减少的程度,信息增益值越大表示该栽培措施对弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量越重要。如图 7 所示,本研究中 3 项栽培措施对弱筋小麦产量和穗粒数的重要性均表现为密度 $>$ 施氮量 $>$ 播期,对穗数和千粒重的重要性均表现为密度 $>$ 播期 $>$ 施氮量,而对籽粒蛋白含量的重要性则表现为播期 $>$ 施氮量 $>$ 密度。

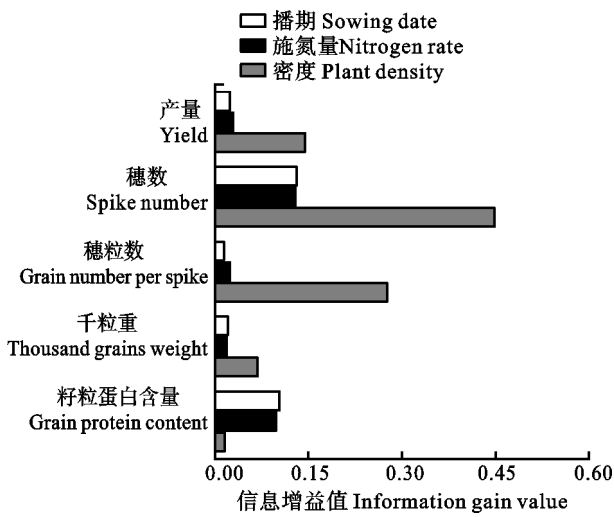


图 7 主要栽培措施对弱筋小麦产量和籽粒蛋白含量的重要性分析

Fig. 7 Importance analysis of main cultivation practices on grain yield and protein content of weak gluten wheat

3 讨论

3.1 主要栽培措施对长江中下游地区弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量的调控

长江中下游地区多为稻麦轮作制,为满足供给侧结构性改革的需求,江苏、安徽、河南、湖北等以籼稻为主的产区逐步推行“籼改粳”,加之水稻小苗机播和直播等轻简技术的应用,不同程度地推迟了水稻成熟期,导致晚播稻茬弱筋小麦面积

逐年扩大、播期显著推迟^[26]。本研究选用目前该地区弱筋小麦生产中的适宜播期范围(10月20日—11月6日)作为对照,近20年Meta分析结果表明,当播期推迟14~21d时产量开始显著降低,平均降幅为9.73%;而推迟28~35d时,产量降幅高达21.43%。进一步分析产量构成因素发现,穗数减少是晚播导致弱筋小麦减产的主要原因,这主要是由于小麦冬前光热资源随播期推迟不断减少,造成单株分蘖急剧减少,进而降低了成熟期穗数^[27]。而推迟播期后弱筋小麦籽粒蛋白含量呈总体上升趋势,当推迟14~21d时显著增加,平均增幅为3.87%。在本研究中千粒重降幅随播期推迟逐渐增大,这说明可能是由于晚播后弱筋小麦籽粒中淀粉积累量减少,进而对蛋白产生了“浓缩效应”,造成籽粒蛋白相对含量上升。综上,晚播不利于弱筋小麦高产和“低蛋白”品质特点的形成,同时明确了产量和籽粒蛋白含量发生显著变化的晚播范围。

该地区弱筋小麦常规施氮量范围为 $210 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在此基础上减氮 $0 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量无显著变化;减氮 $30 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量开始显著降低,平均降幅为 6.42% ;减氮 $60 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量持续下降,最高降幅可达 51.72% 。Zhang 等^[28]和雒文鹤等^[29]研究指出,适量减氮可通过增强小麦根系对土壤氮素的吸收能力提高植株氮利用效率,从而维持穗数、穗粒数、千粒重,因此未造成减产。通过分析产量构成因素发现,在施氮量 $30 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内穗数、穗粒数随施氮水平的提高总体呈下降趋势,其降幅大于千粒重的增幅,造成减产。在常规施氮量基础上减氮 $0 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,籽粒蛋白含量开始显著降低,平均降幅为 2.28% ;随施氮量的逐步减少,籽粒蛋白含量持续下降,当减少 $210 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,降幅高达 19.13% 。这主要归因于减氮会降低灌浆期籽粒游离氨基酸供应水平和贮藏蛋白合成能力,导致醇溶蛋白、麦谷蛋白及麦谷蛋白大聚体含量下降,进而降低籽粒蛋白含量^[30]。可见,适量减氮 ($0 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 能够在维持弱筋小麦产量的同时降低籽粒蛋白含量,继续减氮后籽粒蛋白含量虽进一步下降,但产量也发生显著降低,不利于实现量质协调。

本研究还发现在该地区弱筋小麦常规密度 $180 \times 10^4 \sim 240 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的基础上增加 $30 \times 10^4 \sim 120 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量显著增加,平

均增幅范围为 4.39%~7.11%。通过分析产量构成因素发现,在此范围内弱筋小麦增密后单位面积有效穗数显著增加,其增幅大于穗粒数与千粒重的降幅,使产量呈上升趋势。Wang 等^[31]研究指出,合理密植后弱筋小麦冠层叶绿素密度与光合有效辐射截获增加,进而提高了植株群体光合速率及干物质积累量,实现了增产。与产量对增密的响应趋势相反,在此范围内弱筋小麦籽粒蛋白含量随密度增加而降低,平均降幅范围为 1.16%~3.70%。这可能是由于增密后弱筋小麦群体扩大产生的“稀释效应”导致分配到植株个体及茎、叶、穗等器官的氮减少,进而降低了籽粒蛋白含量^[9]。Zheng 等^[32]研究则表明,增密主要通过减少弱筋小麦籽粒贮藏蛋白(麦谷蛋白、醇溶蛋白)积累与聚合弱化了面团中面筋网络的连接,进而改善了饼干烘焙品质。因此,合理密植可在提高弱筋小麦产量的同时降低籽粒蛋白含量,实现量质协同提升。

3.2 主要栽培措施下弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量的关系及协调

Meta 分析研究结果表明,在长江中下游地区弱筋小麦播期在 10 月 14 日—10 月 31 日时,产量与籽粒蛋白含量随播期推迟均上升;但在 10 月 31 日—11 月 21 日时,推迟播期后产量下降而籽粒蛋白含量上升。在生产中晚播弱筋小麦常处于第二阶段,可见产量降幅与籽粒蛋白含量增幅随播期推迟同步增加,导致量质协调难度加大。在生产中可通过种植耐迟播品种或灌浆期叶面喷施 6-BA、 KH_2PO_4 增加粒重等方式缓解晚播弱筋小麦高产与优质的矛盾^[33-34]。本研究还发现弱筋小麦施氮量在 60~273 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量与籽粒蛋白含量随施氮量减少均下降,而在 273~330 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,减氮后产量增加且籽粒蛋白含量下降。在生产中弱筋小麦施氮量常处于上述第一阶段,因此仅靠减氮实现弱筋小麦量质协调的难度较大。Zheng 等^[9]和周文银等^[35]研究指出增密可通过扩大群体的方式补偿因减氮造成的产量损失并进一步降低籽粒蛋白含量,从而实现弱筋小麦量质协调。本研究首次确定了该地区弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量对增密的响应存在以下 3 种关系:当密度在 $102 \times 10^4 \sim 237 \times 10^4$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量与籽粒蛋白含量均上升;在 $237 \times 10^4 \sim 262 \times 10^4$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量增加而籽粒蛋白含量下降;在 $262 \times 10^4 \sim 450 \times 10^4$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量

与籽粒蛋白含量同步下降。在生产中增密后弱筋小麦产量与籽粒蛋白含量常处于上述第二、三阶段,可见合理密植可在降低籽粒蛋白含量的同时维持产量,协调优质与高产之间的矛盾。胡卫丽等^[36]和王竟绍等^[37]研究指出小麦品种之间株型及耐密性存在差异,可能会造成产量与籽粒蛋白含量对增密的响应有所不同。综上,在长江中下游地区将弱筋小麦播期、施氮量、密度分别控制在 10 月 24 日—10 月 31 日、172~186 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $293 \times 10^4 \sim 360 \times 10^4$ 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时,可保障产量 $> 6\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的同时籽粒蛋白含量 $< 11.5\%$,实现量质协调。

本研究通过分析播期、施氮量、密度下弱筋小麦产量与干物质积累量的关系发现,当产量在 5 812.5~9 148.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围时,与开花期、成熟期植株群体干物质积累量均呈显著正相关关系,且成熟期较开花期相关性更高。这主要是因为小麦籽粒干物质的构成中,仅 1/3 为花前营养器官贮藏物质的再转运,而 2/3 为花后功能叶的光合产物积累^[38]。基于此,本研究明确了当弱筋小麦产量 $> 6\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,植株群体干物质积累量于开花期维持在 9.7~11.3 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,于成熟期维持在 17.5~20.1 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究还发现弱筋小麦籽粒蛋白含量与开花期植株单茎、茎、叶、穗氮含量均呈显著正相关关系,但籽粒蛋白含量对不同器官氮含量变化的响应敏感性存在差异,具体表现为叶 $>$ 穗 $>$ 茎。赵晓慧等^[39]研究也指出小麦花前各器官贮存的氮主要通过蛋白水解酶分解成游离氨基酸转运到籽粒中合成蛋白质,开花期到成熟期叶氮含量降幅最大,其次为穗,而茎降幅最小,与本研究结果相吻合。此外,本研究还明确了当弱筋小麦籽粒蛋白含量 $< 11.5\%$ 时,开花期植株单茎、茎、叶、穗氮含量分别维持在 11.7、5.6、30.7、15.8 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以内。上述研究结果为长江中下游地区弱筋小麦高产优质栽培提供了个体与群体指标参数范围。

致谢:本文基于前人发表的 117 篇文献进行数据整合与分析,但由于篇幅限制未能在参考文献中逐一标注,在此致以衷心的感谢。

参考文献:

- [1] AREPALLY D, REDDY R S, GOSWAMI T K, et al. Biscuit baking: A review [J]. LWT, 2020, 131: 109726.
- [2] 胡学旭, 孙丽娟, 周桂英, 等. 2006—2015 年中国小麦质量年

- 度变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3063.
- HU X X, SUN L J, ZHOU G Y, *et al.* Variations of wheat quality in China from 2006 to 2015 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3063.
- [3] 姚金保, EDWARD SOUZA, 马鸿翔, 等. 软红冬小麦品质性状与饼干直径的关系[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 695.
- YAO J B, SOUZA E, MA H X, *et al.* Relationship between quality traits of soft red winter wheat and cookie diameter [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 695.
- [4] 马瑞琦, 王德梅, 陶志强, 等. 施氮量对北部冬麦区种植弱筋小麦产量与品质的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 163.
- MA R Q, WANG D M, TAO Z Q, *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield and quality of weak gluten wheat in northern winter wheat region [J]. *Crops*, 2023(1): 163.
- [5] HAWKESFORD M J. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3): 276.
- [6] 张平平, 刘婷婷, 姚金保, 等. 栽培措施对软红冬小麦加工品质的效应[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(6): 789.
- ZHANG P P, LIU T T, YAO J B, *et al.* Effect of cultivation strategies on processing quality of soft red winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(6): 789.
- [7] YU Z T, ISLAM S, SHE M Y, *et al.* Wheat grain protein accumulation and polymerization mechanisms driven by nitrogen fertilization [J]. *The Plant Journal*, 2018, 96(6): 1160.
- [8] 汤小庆, 丁永刚, 梁鹏, 等. 减少追氮量对弱筋小麦品种农艺性状和生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 88.
- TANG X Q, DING Y G, LIANG P, *et al.* Effect of topdressed nitrogen reduction on agronomic and physiological characteristics of weak-gluten wheat cultivar [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 88.
- [9] ZHENG B Q, ZHANG X Q, WANG Q, *et al.* Increasing plant density improves grain yield, protein quality and nitrogen agronomic efficiency of soft wheat cultivars with reduced nitrogen rate [J]. *Field Crops Research*, 2021, 267: 108145.
- [10] ZHENG B Q, JIANG J L, WANG L L, *et al.* Reducing nitrogen rate and increasing plant density accomplished high yields with satisfied grain quality of soft wheat *via* modifying the free amino acid supply and storage protein gene expression [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(7): 2146.
- [11] RUSSELL B, GUZMAN C, MOHAMMADI M. Cultivar, trait and management system selection to improve soft-red winter wheat productivity in the eastern United States [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 335.
- [12] 任开明, 王犇, 杨文俊, 等. 施氮对稻茬弱筋小麦生长特性、品质与产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 769.
- REN K M, WANG B, YANG W J, *et al.* Effects of nitrogen on physiological growth, quality and yield of weak gluten wheat after rice stubble [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(4): 769.
- [13] 张海悦, 张杨, 陈长生. Meta 分析应用中常见的问题[J]. 中国儿童保健杂志, 2020, 28(1): 113.
- ZHANG H Y, ZHANG Y, CHEN C S. Common problems in meta-analysis applications [J]. *Chinese Journal of Child Health Care*, 2020, 28(1): 113.
- [14] 马佳玉, 王涛, 刘小利, 等. 覆盖作物对我国粮食作物的产量效应及影响因素的 Meta 分析[J]. 中国农业科学, 2023, 56(10): 1871.
- MA J Y, WANG T, LIU X L, *et al.* Meta-analysis of yield effects and influencing factors of cover crops on main grain crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10): 1871.
- [15] 章力干, 石心怡, 王玉宝, 等. 秸秆还田对中国主要粮食作物病害影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 93.
- ZHANG L G, SHI X Y, WANG Y B, *et al.* Meta-analysis for the impacts of straw return on the diseases of major grain crops in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 93.
- [16] ZHAO S C, XU X P, QIU S J, *et al.* Response of wheat and maize yields to different tillage practices across China: A meta-analysis [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 144: 126753.
- [17] NICOLAS G, SADRAS VICTOR O, LOLLATO ROMULO P. Late-season nitrogen application increases grain protein concentration and is neutral for yield in wheat: A global meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2023, 290: 108740.
- [18] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7.
- ZHENG K, HE J, LI H W, *et al.* Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 7.
- [19] 孔祥飞, 李超, 杨广, 等. 基于 Meta 分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 118.
- KONG X F, LI C, YANG G, *et al.* Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using meta-analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 118.
- [20] ISHFAQ M, WANG Y Q, XU J L, *et al.* Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: A global meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(6): 74.
- [21] QUINN D J, LEE C D, POFFENBARGER H J. Corn yield response to sub-surface banded starter fertilizer in the U. S.: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2020, 254: 107834.
- [22] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150.
- [23] PALLMANN P. Applied meta-analysis with R [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2015, 42(4): 914.
- [24] 孙力扬, 徐明岗, 王晋峰, 等. 北方地区土壤速效养分及容重

- 对秸秆还田的响应[J]. 中国农学通报, 2023, 39(5): 102.
- SUN L Y, XU M G, WANG J F, *et al.* Response of soil available nutrients and bulk density to straw returning in North China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(5): 102.
- [25] 谢鑫, 张贤勇, 杨霖琳. 融合信息增益与基尼指数的决策树算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(10): 139.
- XIE X, ZHANG X Y, YANG J L. Decision tree algorithm fusing information gain and gini index [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(10): 139.
- [26] 张洪程, 张军, 龚金龙, 等. “籼改粳”的生产优势及其形成机理[J]. 中国农业科学, 2013, 46(4): 686.
- ZHANG H C, ZHANG J, GONG J L, *et al.* The productive advantages and formation mechanisms of “Indica rice to Japonica rice” [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(4): 686.
- [27] ZHANG Z Z, CHENG S, FAN P, *et al.* Effects of sowing date and ecological points on yield and the temperature and radiation resources of semi-winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(5): 1366.
- [28] ZHANG D, WANG H Y, PAN J T, *et al.* Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 8.
- [29] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 924.
- LUO W H, SHI Z J, WANG X M, *et al.* Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(6): 924.
- [30] ZHONG C, HUANG J W, JIANG D, *et al.* Metabolomic analysis reveals patterns of whole wheat and pearling fraction flour quality response to nitrogen in two wheat lines with contrasting protein content [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(5): 2290.
- [31] WANG C C, ZHANG K, LIU Q, *et al.* Effects of dense planting patterns on photosynthetic traits of different vertical layers and yield of wheat under different nitrogen rates [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(2): 594.
- [32] ZHENG B Q, FANG Q, ZHANG C X, *et al.* Reducing nitrogen rate and increasing plant density benefit processing quality by modifying the spatial distribution of protein bodies and gluten proteins in endosperm of a soft wheat cultivar [J]. *Field Crops Research*, 2020, 253: 107831.
- [33] 吴进东, 丁广礼, 朱旺生, 等. 氮肥后移与花后叶面喷施 6-BA 对冬小麦产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(2): 343.
- WU J D, DING G L, ZHU W S, *et al.* Effects of postponing nitrogen application and spraying foliar 6-BA after anthesis on grain yield and quality of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2014, 28(2): 343.
- [34] 唐秀巧, 王静静, 龙媛媛, 等. 花后喷施 KH_2PO_4 对灌浆期高温胁迫下小麦根系生理特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1685.
- TANG X Q, WANG J J, LONG Y Y, *et al.* Effect of spraying KH_2PO_4 after anthesis on root physiological characteristics and yield of wheat under high temperature stress at grain filling stage [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2022, 36(8): 1685.
- [35] 周文银, 李文阳, 李浩杰, 等. 追氮量与密度互作对弱筋小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(11): 1456.
- ZHOU W Y, LI W Y, LI H J, *et al.* Effects of nitrogen top-dressing and density interaction on yield, quality and nitrogen utilization of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(11): 1456.
- [36] 胡卫丽, 王永华, 李刘霞, 等. 氮密调控对两种穗型冬小麦品种茎秆干物质积累与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(6): 808.
- HU W L, WANG Y H, LI L X, *et al.* Effects of nitrogen and plant density on dry matter accumulation and translocation in main stem and tillers of two spike-types of winter wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(6): 808.
- [37] 王竞绍, 谭娟, 邹兵, 等. 密度和氮肥运筹对 2 种穗型小麦叶面积指数与产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(17): 35.
- WANG J S, TAN J, ZOU B, *et al.* Effects of density and nitrogen fertilizer management on the yield and leaf area index of wheat with different spike types [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(17): 35.
- [38] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 等. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 599.
- MU H R, JIANG D, DAI T B, *et al.* Effect of shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characters in wheat flag leaves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 599.
- [39] 赵晓慧, 张艳艳, 戎亚思, 等. 不同水氮条件下冬小麦穗器官临界氮稀释模型研究[J]. 中国农业科学, 2022, 55(17): 3321.
- ZHAO X H, ZHANG Y Y, RONG Y S, *et al.* Study on critical nitrogen dilution model of winter wheat spike organs under different water and nitrogen conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3321.