

网络出版时间:2026-03-16

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260313.1807.002

小麦光合与干物质积累指标及产量对追肥类型的响应

张向前^{1,2}, 尚云秋¹, 赵竹¹, 丁永刚¹, 李玮¹,

陈欢¹, 杜世州¹, 乔玉强¹, 曹承富¹, 汪勇²

(1. 安徽省农业科学院作物研究所, 安徽合肥 230031;

2. 作物抗逆与高效生产全国重点实验室, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了解拔节期追施不同类型肥料对小麦光合特性和产量的效应, 在基肥施用种类和量相同条件下, 比较分析了拔节期追施相同量的 3 种不同类型肥料 F_1 (三元复合肥, $N:P_2O_5:K_2O=15:15:15$)、 F_2 (小麦专用复合肥, $N:P_2O_5:K_2O=26:10:9$)、 F_3 (尿素) 和不追肥 (CK) 间小麦光合指标、干物质积累指标及产量的差异。结果表明, F_3 处理较 F_2 处理增加了小麦生育中、前期叶面积指数, 而 F_2 处理有利于维持灌浆期较高叶面积指数。 F_2 处理开花期和灌浆中期旗叶叶绿素含量显著高于 F_1 处理 ($P<0.05$), 与 F_3 处理间差异不显著。旗叶光合速率以 F_2 处理最高; F_2 处理开花期和灌浆中期冠层光合有效辐射在濉溪和颍上点较 F_3 处理显著增加, 增幅 4.74%、4.18% 和 5.83%、5.09%; F_1 处理较 F_3 处理能提高旗叶光合速率, 但会降低冠层光合有效辐射。籽粒灌浆速率表现为 $F_2>F_1>F_3>CK$, 3 个追肥处理显著高于 CK。 F_3 处理孕穗期和开花期群体干物质积累量高于 F_2 处理, 而成熟期 F_2 处理群体干物质积累量高于 F_3 处理。追肥处理的产量表现为 $F_2>F_1>F_3$, 3 者间差异均显著, 其中 F_2 处理在濉溪和颍上点比 F_1 处理分别增加 7.26% 和 8.13%。综上所述, 追施尿素能提高小麦生育前期叶面积指数、旗叶叶绿素含量和群体干物质积累量, 追施小麦专用复合肥可改善小麦生育中、后期光合指标、籽粒灌浆速率和干物质积累量, 较追施三元复合肥和尿素显著增产。

关键词: 光合速率; 冠层光合有效辐射; 灌浆速率; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0473-09

Response of Wheat Photosynthesis and Dry Matter Accumulation Indexes and Yield to Different Types of Topdressing Fertilizers

ZHANG Xiangqian^{1,2}, SHANG Yunqiu¹, ZHAO Zhu¹, DING Yonggang¹, LI Wei¹,

CHEN Huan¹, DU Shizhou¹, QIAO Yuqiang¹, CAO Chengfu¹, WANG Yong²

(1. Crops Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei, Anhui 230031, China; 2. State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the effects of different types of fertilizers on the photosynthetic characteristics and yield of wheat at the jointing stage, the effects of three different types of fertilizers: F_1 (ternary compound fertilizer, $N:P_2O_5:K_2O=15:15:15$), F_2 (wheat compound fertilizer, $N:P_2O_5:K_2O=26:10:9$), F_3 (urea) and no topdressing (CK) on wheat photosynthetic indices, dry matter accumulation and yield were studied under the same type and amount of base fertilizer application at the jointing stage. The results showed that the application of F_3 at the jointing stage increased the leaf area index at the middle and early stages of wheat growth compared with F_2 , and the F_2 treatment was conducive to maintaining the higher leaf area index at the filling stage. The chlorophyll content of F_2

收稿日期: 2025-04-29

修回日期: 2025-05-30

基金项目: 作物抗逆与高效生产全国重点实验室开放课题基金 (SKLCSRHPKF2025002); 安徽小麦良种联合攻关项目; 国家自然科学基金项目 (32301447)

第一作者 E-mail: xiangqian111@163.com (张向前)

通讯作者 E-mail: dsz315@sina.com (杜世州); wangyong2114@163.com (汪勇)

treatment was significantly higher than that of F_1 treatment ($P < 0.05$) at the flowering stage and filling stage, and there was no significant difference when compared with F_3 treatment. The photosynthetic rate of F_2 was the highest, compared to F_3 , F_2 significantly increased canopy photosynthetically active radiation at flowering and middle of filling stages by 4.74%, 4.18% and 5.83%, 5.09%, respectively in Suixi and Yingshang experimental sites. F_1 can increase the photosynthetic rate compared with F_3 , but reduce the photosynthetically available radiation in the canopy. The grain filling rate ranked as $F_2 > F_1 > F_3 > CK$, and the grain filling rate of CK was significantly lower than that of the treatments. The dry matter accumulation of the F_3 group was higher than that of the F_2 treatment at the booting and flowering stages, while the dry matter accumulation of the F_2 group was higher than that of the F_3 treatment at the maturity stage. The yield of topdressing treatments ranked as $F_2 > F_1 > F_3$, with significant differences. Compared to F_1 , F_2 increased yield by 7.26% and 8.13%, respectively in Suixi and Yingshang experimental sites. All the findings demonstrated that although topdressing with the same weight of urea increased the leaf area index, chlorophyll content and population dry matter accumulation of wheat at early growth stage, topdressing with specialized compound fertilizer had more advantages in improving photosynthetic indices, grain filling rate and population dry matter accumulation at the middle and later growth stages of wheat. Topdressing with specialized compound fertilizer increased yield when compared to ternary compound fertilizer and urea.

Keywords: Photosynthetic rate; Canopy photosynthetically active radiation; Grain filling rate; Yield

相同施肥量下增加施肥次数有利于满足小麦不同生育期养分需求,可提高肥料利用效率,但较费人力^[1]。随着农业技术发展和新型肥料的出现,小麦仅需一基一追2次施肥就可实现高产高效生产。张子旋等^[2]研究强筋和中筋小麦氮肥追施技术提出,中筋小麦氮肥基追比以5:5较为合适,而基追比4:6可提高强筋小麦产量和蛋白含量。邓丽娟等^[3]研究发现,优化施氮量和基追比能协同实现小麦高产、优质目标。Zhang等^[4]研究认为,将部分基肥后移至拔节期施用,可以延缓小麦叶片衰老,提高粒重,增加花后干物质积累量,进而显著提高产量。

除施肥量和时期外,肥料类型对小麦光合指标、干物质积累量和产量也具有显著影响^[5]。王好斌等^[6]研究表明,施用减氮20%的小麦专用肥($N:P_2O_5:K_2O=18:15:12$,含中、微量元素Mg、S、Zn、B),其产量和效益与农户传统施肥处理基本一致。郑学博等^[7]研究认为,相同施肥量下,施用控释肥($N:P_2O_5:K_2O=23:17:5$)和缓释肥($N:P_2O_5:K_2O=24:12:6$)的小麦比常规施肥分别增产1.1%和6.7%,氮肥回收率提高10.5%和13.7%。刘倩倩等^[8]研究指出,施用缓控释型、稳定型和复合型等新型肥料能更好地协调养分释放速度与小麦需求量关系,提高冬小麦产量和肥料利用率。

鉴于目前小麦生产中部分地区只施基肥不施拔节肥或拔节肥只追施氮肥导致小麦增产困难、效益较低的现状,本研究以拔节期不追肥为对照,探讨拔节期追施相同量不同类型肥料对小麦光合指标、干物质积累量和产量的影响,以期小麦丰产、增效生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2023—2024年在安徽省濉溪县和颍上县试验基地进行,濉溪县试验点0~20 cm耕层土壤全氮 $1.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $106.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $9.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $109.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $19.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH值5.7;颍上县试验点0~20 cm耕层土壤全氮 $1.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $105.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $8.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $105.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $18.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH值5.7。试验为单因素设计,设置3种追肥类型,分别为 F_1 (三元复合肥, $N:P_2O_5:K_2O=15:15:15$)、 F_2 (小麦专用复合肥, $N:P_2O_5:K_2O=26:10:9$)、 F_3 (尿素, $N\geq 46\%$),以不追肥为对照(CK),追肥时期为拔节期,3种肥料追施量均为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。小区面积 12 m^2 ($4\text{ m}\times 3\text{ m}$),每个处理3次重复。种植小麦品种为华成3366,

2023 年 10 月 13 播种,播种前施基肥,基肥为 600 kg·hm⁻² 小麦专用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=26:10:9),种植密度为基本苗 240×10⁴ 株·hm⁻²,2024 年 6 月 3 日收获。其他病虫害防治和田间管理措施同一般高产大田。

1.2 测定指标与方法

叶面积指数:于孕穗期、开花期和灌浆中期用直尺测量单株绿色叶片的长度和最宽处,长和宽的乘积再乘折算系数 0.83 为单叶面积,每小区 10 株;叶面积指数=叶片总面积/土地面积。

叶绿素含量:用手持式叶绿素测定仪(SPAD-502)于小麦开花期和灌浆中期测定旗叶 SPAD 值。

光合速率:采用 Li-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)于开花期和灌浆中期晴朗无云天,在上午 9:30—11:30 测定小麦旗叶光合速率。

冠层光合有效辐射:于小麦开花期和灌浆中期采用英国 Delta 公司生产的 SUNSCAN 冠层分析系统(SUNSCAN Canopy Analysis System)测定,冠层光合有效辐射由冠层上、下光合有效辐射量之差计算得出,测量时间为上午的 9:00—11:30 和下午的 14:00—16:00。

籽粒灌浆速率:于开花期、灌浆中期和成熟期,每小区取 10 个主茎穗,重复 3 次,人工剥粒、装袋后置于 105℃ 烘箱杀青 30 min,75℃ 烘干至恒重,计算灌浆速率(前后两生育期籽粒干物重差值/前后两生育期间隔天数)。

干物质积累量:分别于孕穗期、开花期、灌浆中期和成熟期,每小区取 10 株地上部植株,将所取样品在 105℃ 下杀青 20 min,80℃ 烘干至恒重,计算干物质积累量。

产量:成熟期分小区收割、晒干后,计算产量。

1.3 统计分析

采用 Excel 2021 对数据进行处理和作图,采用 SPSS 21.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 追肥类型对光合指标的影响

2.1.1 对叶面积指数的影响

由表 1 可知,在濉溪和颍上试验点,小麦孕穗期、开花期的叶面积指数以 F₃ 处理最高,其次为 F₂ 和 F₁ 处理,而灌浆中期 F₂ 处理叶面积指数高于 F₃ 处理。这表明拔节期追肥量相同下,F₃ 处理相比 F₂ 处理能增加小麦生育中前期叶面积指数,而 F₂ 处理有利于维持小麦生育后期(灌浆期)较高叶面积指数。在濉溪和颍上试验点,F₂ 处理小麦各生育时期叶面积指数均显著高于 F₁ 处理(P<0.05),孕穗期、开花期、灌浆中期分别增加 9.20%、8.26%、8.42% 和 10.82%、15.04%、20.00%。F₃ 处理 3 个生育时期叶面积指数均显著高于 F₁ 处理(濉溪县灌浆中期除外);CK 的叶面积指数在两个试点的 3 个生育时期均显著低于追肥处理。

2.1.2 对旗叶叶绿素含量的影响

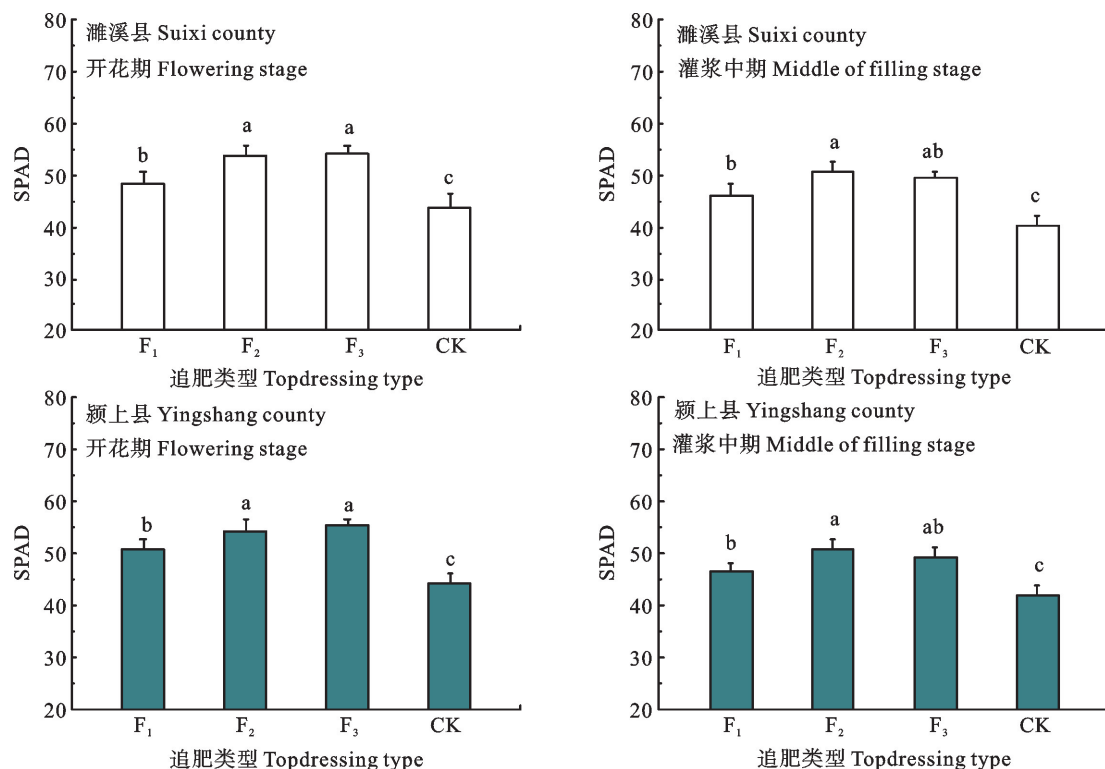
两个试点 F₃ 处理的开花期旗叶叶绿素含量高于 F₂ 处理,而 F₂ 处理的灌浆中期叶绿素含量高于 F₃ 处理,但二者间差异均不显著(图 1)。开花期 F₃ 处理叶绿素含量显著高于 F₁ 处理(P<0.05),而灌浆中期 F₃ 与 F₁ 处理间差异不显著。F₂ 处理开花期和灌浆中期叶绿素含量均显著高于 F₁ 处理,表明拔节期追肥量相同条件下,F₂ 处理相比 F₁ 处理能显著提高小麦生育中后期旗叶叶绿素含量。

表 1 拔节期追施不同类型肥料对不同生育时期叶面积指数的影响

Table 1 Effect of different types of topdressing fertilizers during jointing stage on leaf area index at different growth stages

试点和处理 Site and treatment	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of grain-filling stage
濉溪县 Suixi county			
F ₁	5.11±0.12b	5.57±0.23b	4.75±0.29b
F ₂	5.58±0.12a	6.03±0.16a	5.15±0.17a
F ₃	5.83±0.16a	6.36±0.20a	5.01±0.13ab
CK	4.48±0.07c	5.15±0.19d	3.86±0.16c
颍上县 Yingshang county			
F ₁	5.27±0.17b	5.65±0.09c	4.45±0.13b
F ₂	5.84±0.16a	6.50±0.17b	5.34±0.23a
F ₃	5.91±0.15a	6.87±0.08a	5.19±0.18a
CK	4.68±0.12c	5.11±0.07d	3.99±0.12c

数据为平均数±标准差;相同试点同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。表 2 同。
Values are means±SD. Different letters following data in the same columns indicate significant difference among treatments(P<0.05). The same in table 2.



柱状图上的不同字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

Different letters above bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same in figures 2—5.

图1 追肥类型对不同生育时期旗叶 SPAD 的影响

Fig. 1 Effect of different types of topdressing on SPAD of flag at different growth stages

2.1.3 对旗叶光合速率的影响

由图2可知,小麦开花期和灌浆中期旗叶的光合速率以F₂处理最高,且在濉溪点显著高于其他处理($P < 0.05$),较F₃处理分别增加了12.80%和10.94%。在颖上点,开花期各追肥处理间差异不显著;在灌浆中期,F₂与F₁处理间差异不显著,但显著高于F₃处理。这表明追施相同量肥料,F₂处理较F₁和F₃处理有利于提高小麦叶片光合速率。F₁处理光合速率高于F₃处理,其中在濉溪点灌浆中期二者间差异显著。CK的旗叶光合速率显著低于F₁、F₂和F₃处理。

2.1.4 对冠层光合有效辐射的影响

在两个试点,小麦开花期和灌浆中期的冠层光合有效辐射均表现为F₂ > F₃ > F₁ > CK,且不同处理间差异显著($P < 0.05$)(图3)。F₂处理开花期和灌浆中期的冠层光合有效辐射在濉溪、颖上点较F₃处理分别增加了4.74%、4.18%和5.83%、5.09%,F₃处理较F₁处理分别增加了5.28%、4.41%和6.72%、4.63%。这表明追施相同量肥料对小麦冠层光合有效辐射的效应由大到小依次为F₂、F₃和F₁处理。

2.2 追肥类型对干物质积累指标的影响

2.2.1 对灌浆速率的影响

由图4可知,F₂处理灌浆速率高于F₁处理,但二者间差异不显著,表明拔节期F₂处理较F₁处理有利于提高灌浆速率。F₁处理开花—灌浆中期、灌浆中期—成熟期的灌浆速率在濉溪和颖上点分别比F₃处理增加了6.79%、8.89%和7.99%、7.70%,表明拔节期追施相同量肥料,F₁处理较F₃处理可提高灌浆速率。CK的灌浆速率显著低于F₁、F₂和F₃处理。

2.2.2 对干物质积累量的影响

由表2可知,孕穗期和开花期F₃处理的干物质积累量高于F₂处理,而成熟期F₂处理干物质积累量高于F₃处理,表明F₃较F₂处理可提高小麦生育中前期干物质积累量,F₂处理更有利于提高成熟期干物质积累量。孕穗期和开花期F₃处理干物质积累量均显著高于F₁处理,而灌浆中期和成熟期二者间差异不显著。F₂处理孕穗期、开花期、灌浆中期、成熟期的干物质积累量较F₁处理在濉溪和颖上点分别增加了7.76%、8.11%、1.61%、2.49%和7.48%、3.03%、1.09%、1.11%。

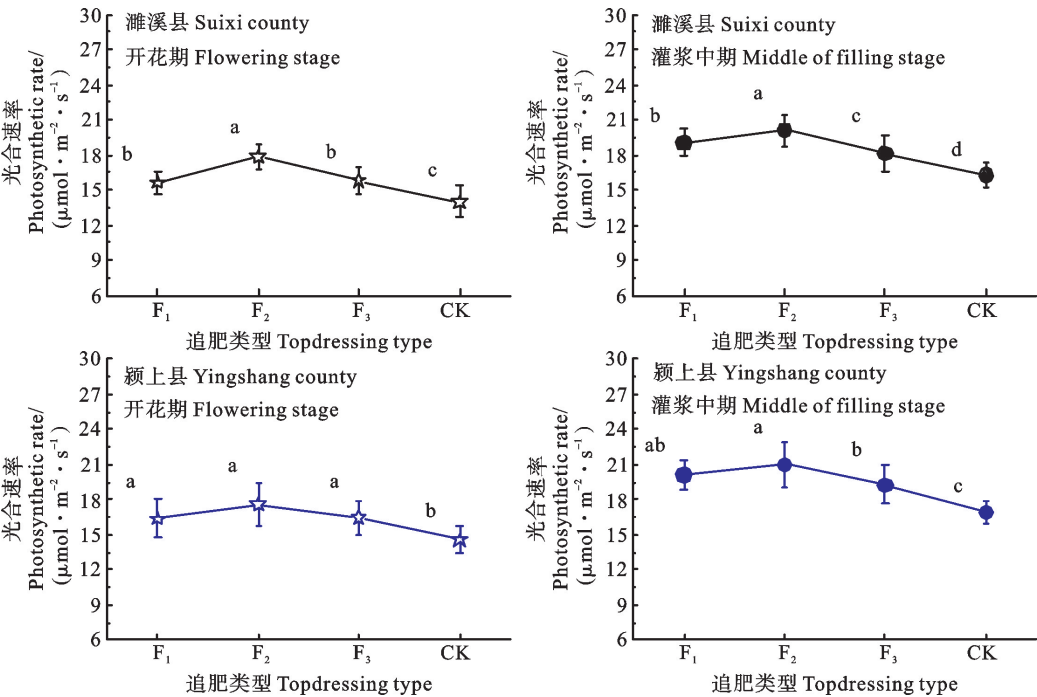


图 2 追肥类型对不同生育时期旗叶光合速率的影响

Fig. 2 Effect of different types of topdressing on photosynthetic rate of flag at different growth stages

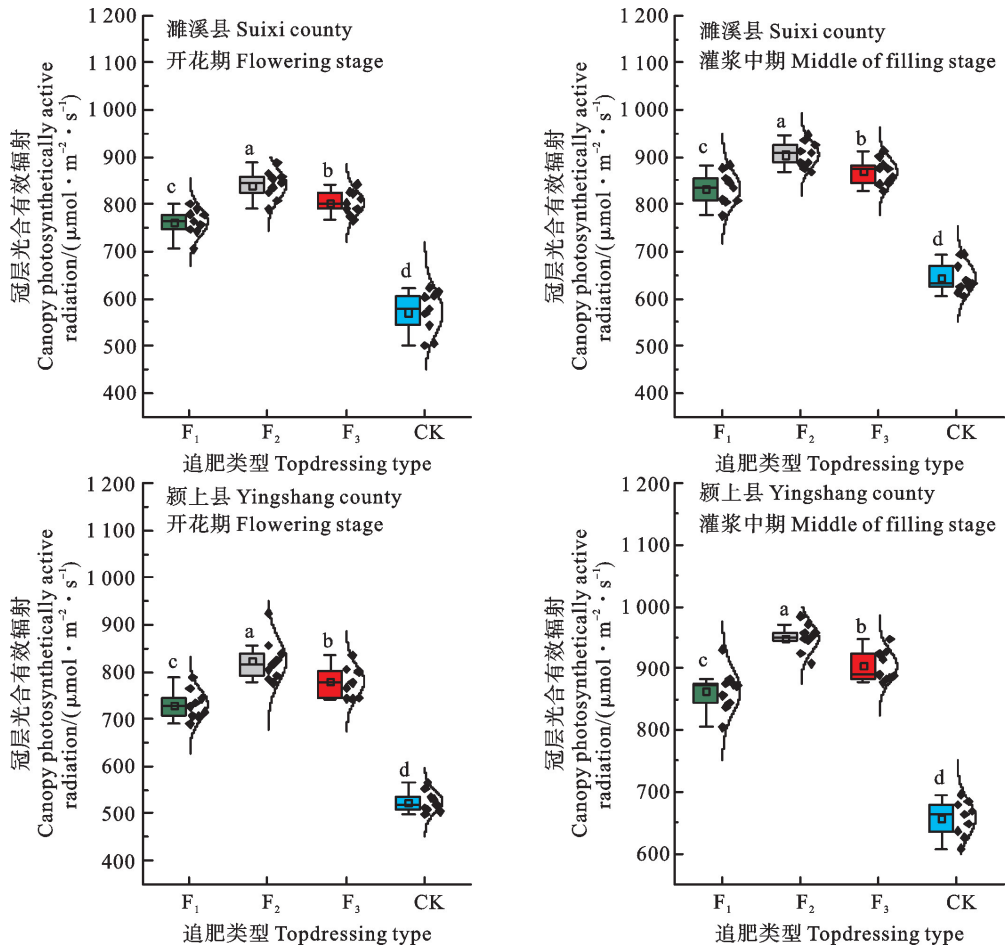


图 3 追肥类型对不同生育时期冠层光合有效辐射的影响

Fig. 3 Effect of different types of topdressing on canopy photosynthetically active radiation at different growth stages

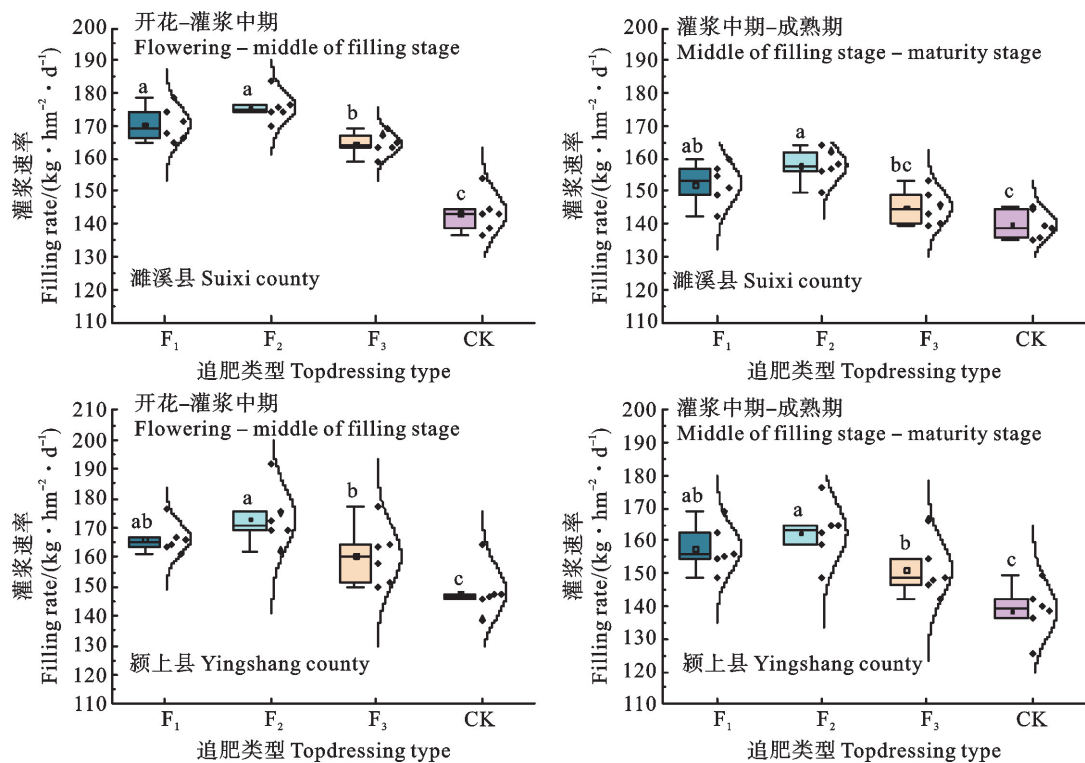


图 4 追肥类型对籽粒灌浆速率的影响

Fig. 4 Effect of different types of topdressing on grain filling rate

表 2 追肥类型对小麦不同生育期干物质积累量的影响

Table 2 Effect of different types of topdressing on dry matter accumulation at different growth stages $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

试点 Site	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of filling stage	成熟期 Maturity stage
濉溪县 Suixi county				
F ₁	9 081.17±54.83b	12 211.60±556.67b	19 340.07±792.69a	23 087.07±683.90a
F ₂	9 785.70±99.22a	13 202.37±284.82a	19 651.63±242.36a	23 661.13±715.62a
F ₃	9 889.07±107.32a	13 511.10±464.70a	19 643.43±489.35a	23 365.23±595.16a
CK	8 137.63±99.79c	10 448.70±414.28c	14 803.07±246.63b	17 968.07±64.99b
颍上县 Yingshang county				
F ₁	8 954.47±71.73c	11 955.63±273.80b	19 530.00±367.73a	22 956.40±386.75a
F ₂	9 624.60±145.44b	12 318.40±120.28b	19 743.17±162.49a	23 211.20±232.62a
F ₃	9 845.77±70.19a	12 929.50±207.88a	19 828.83±45.24a	22 881.43±262.36a
CK	7 852.10±118.03d	9 836.87±96.39c	13 628.80±408.15b	17 217.00±325.60b

2.3 追肥类型对产量的影响

由图 5 可知,F₂ 处理产量显著高于其他处理 ($P<0.05$),在濉溪和颍上点分别比 F₁ 处理增加 7.26%和 8.13%,较 F₃ 处理分别增加 12.19%和 10.94%;F₁ 处理产量显著高于 F₃ 处理,CK 处理产量显著低于 F₁、F₂ 和 F₃ 处理。

3 讨论

光合效率与作物的生长发育状态密切相关,

并受施肥方式和肥料类型影响,肥效在作物光合特性上主要表现为叶面积指数、叶绿素含量、光合速率和冠层光合有效辐射的差异。Yousefi 等^[9]研究发现,施用新型生物肥相比控释肥和普通肥料可以提高豌豆叶面积指数和光合有效辐射。Chen 等^[10]研究指出,不同施肥类型和用量会导致棉花叶片光合效率的明显不同。马泉等^[11]研究认为,硫包膜缓释肥两次施用相比于尿素多次分施或缓释肥基施加尿素追施,更利于维持小麦花后叶

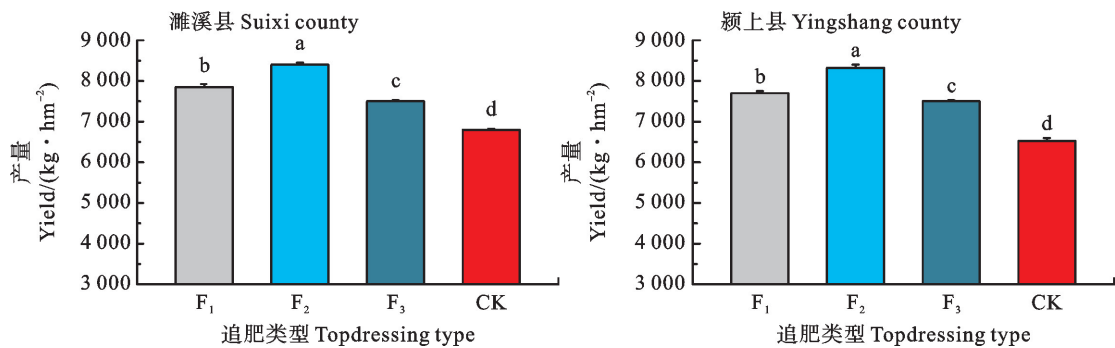


图 5 追肥类型对小麦产量的影响

Fig. 5 Effect of different types of topdressing on wheat yield

片较高的叶绿素含量,延缓旗叶衰老,提高乳熟期冠层光合有效辐射截获率,使植株在花后维持更高的净光合速率和光合电子传递效率。本研究中,拔节期追肥量相同时,施用小麦专用复合肥更有利于维持灌浆期较高叶面积指数和叶绿素含量;较追施尿素和三元复合肥能明显提高小麦开花期和灌浆中期光合速率和冠层光合有效辐射;追施三元复合肥较尿素能提高旗叶光合速率,但会降低冠层光合有效辐射。追施小麦专用复合肥相比三元复合肥和尿素能改善小麦光合指标主要可能是由于小麦专用肥是根据土壤养分供应状况和植株养分吸收规律优化后的配方肥料,其养分供应能更好满足植株生长发育所需,进而改善和优化作物光合指标^[8]。罗一鸣等^[12]对香稻的研究有同样结论:与常规施肥相比,香稻专用肥显著提高了 4 个香稻品种生育中后期的叶面积指数、SPAD 值和旗叶光合速率,专用肥处理的香稻生育后期光合生产能力优势明显。

合理的肥料运筹可协调作物不同生育期的养分需求特性,延长叶片功能期和持绿期,改善植株光合特性,提高籽粒灌浆速率和干物质积累量^[13]。李旭铮等^[14]研究表明,缓释肥配施尿素有助于玉米籽粒灌浆的早启动,缩短达到最大灌浆速率的时间,延长灌浆活跃期,提高快增期、缓增期的持续时间及灌浆速率,进而提高百粒重。张军等^[15]研究认为,有机肥部分替代氮肥提高了旱地冬小麦干物质生产效率,增加了各生育时期的干物质积累量。易媛等^[16]报道,在不同春季追肥模式中,返青期追施缓释肥相比拔节期追施尿素可有效促进小麦干物质积累,有利于籽粒灌浆和产量形成。本研究在拔节期追施不同类型肥料,发现拔节期不追肥处理的籽粒灌浆速率和干

物质积累量显著低于其它追肥处理,拔节期追施小麦专用肥的籽粒灌浆速率明显高于追施尿素和普通三元复合肥,追施专用肥相比三元复合肥可以提高群体干物质积累量,而相比追施同等量尿素仅在小麦生育中后期表现出增加群体干物质积累量的优势。追施小麦专用复合肥相比普通三元复合肥和尿素能提高籽粒灌浆速率和中后期群体干物质积累量可能有两个原因:(1)专用肥具有更为合理的养分配比,能提高植株光合指标(前文研究结果),进而提高群体干物质积累量和灌浆速率;(2)尿素和三元复合肥相比小麦专用肥养分结构不够合理,易造成土壤质量下降、作物养分利用效率低,导致群体干物质积累速率及干物质在籽粒中的分配量降低。王犇等^[17]的研究也得到同样结论,在拔节期追施缓释掺混肥料和小麦配方肥较常规施肥能明显增加干物质在籽粒中的分配量和比例,提高小麦籽粒灌浆速率和延长有效灌浆天数。

肥料施用类型和方式对作物产量形成具有明显影响,如郭婷等^[18]研究发现,有机肥替代 30% 氮肥能丰富土壤微生物群落,促进土壤养分吸收,提高小麦养分利用效率,进而提高干物质积累量和籽粒产量。耿若鑫等^[19]研究指出,与施用常规量尿素相比,在施氮量减少 30% 条件下,以脲铵氮肥为氮源或配合 N-丁基硫代磷酸三胺/3,4-二甲基吡啶磷酸盐,一次追施可以保证不降低产量,且提高氮肥利用率。本研究结果显示,拔节期追施相同量小麦专用复合肥相比普通三元复合肥和尿素有利于提高小麦产量。追施小麦专用复合肥相比尿素和普通三元复合肥能改善小麦光合能力,提高干物质积累量和产量主要可能有 3 个原因,(1)拔节期追施尿素虽然提供了更多的 N 源,

但是会导致小麦生育中后期缺少磷钾主要营养元素,在一定程度上限制了小麦生长发育和光合能力;(2)追施普通三元复合肥虽然也提供了一定量的氮磷钾营养元素,但不如小麦专用复合肥氮磷钾三大营养元素配比合理,能更好满足专用作物的养分需求^[20-21]; (3)相同施用量下,尿素提供了过多的N元素(缺磷钾),而普通三元复合肥提供的氮量偏低(磷钾偏高),小麦专用肥高氮低磷钾的配方更适宜于小麦生长发育、光合改善和产量形成。

在多数小麦种植区建议推广施用小麦专用复合肥以实现增产增效。由于研究未涉及到新型缓控释肥料、水溶性肥料及生物有机肥等,因此在农户有上述新型肥料的条件下,应结合土壤基础肥力和小麦养分需求特点综合考虑,选择最合理的肥料类型。

4 结论

拔节期追肥量相同条件下,施用小麦专用复合肥相比三元复合肥和尿素更利于改善小麦生育中后期光合指标、籽粒灌浆速率和群体干物重,可显著增产。

参考文献:

- [1] SCHILLACI C, TADIELLO T, ACUTIS M, *et al.* Reducing topdressing N fertilization with variable rates does not reduce maize yield [J]. *Sustainability*, 2021, 13(14): 8059.
- [2] 张子旋, 王艳群, 甄怡铭, 等. 强筋和中筋小麦氮肥适宜基追比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1249.
- [3] 邓丽娟, 焦小强. 氮管理对冬小麦产量和品质影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2355.
- [4] ZHANG Z X, WANG Y Q, ZHEN Y M, *et al.* Optimum basal and topdressing ratios of nitrogen fertilizer for strong and medium gluten wheat cultivars [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1249.
- [5] 李好斌, 范钧翔, 谷守玉, 等. 小麦专用肥在河南省典型地区的应用效果研究[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(1): 111.
- [6] WANG H B, FAN J X, GU S Y, *et al.* Application effect of wheat special fertilizer in typical area of Henan Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(1): 111.
- [7] 郑学博, 崔键, 马超, 等. 施肥措施对砂姜黑土小麦生长性状、营养元素累积及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 550.
- [8] ZHENG X B, CUI J, MA C, *et al.* Effects of different fertilization schemes on growth, accumulation and transportation of nutrient elements and yield of wheat in lime-concreted black soil region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 550.
- [9] 刘倩倩, 陈欢, 张存岭, 等. 新型专用肥对冬小麦产量、氮素吸收与利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1186.
- [10] LIU Q Q, CHEN H, ZHANG C L, *et al.* Effects of new and specific fertilizers on yield, nitrogen uptake and utilization of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1186.
- [11] YOUSEFI A, MIRZAEITALARPOSHTI R, NABATI J, *et al.* Evaluation radiation use efficiency and growth indicators on two mung bean (*Vigna radiata* L.) genotypes under the influence of biological fertilizers [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(8): 1095.
- [12] CHEN J Q, GUO Z D, CHEN H N, *et al.* Effects of different potassium fertilizer types and dosages on cotton yield, soil available potassium and leaf photosynthesis [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(2): 275.
- [13] 马泉, 姚远, 郑国利, 等. 硫包膜缓释肥施用模式对稻茬冬小麦冠层结构、光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 471.
- [14] MA Q, YAO Y, ZHENG G L, *et al.* Effect of application patterns of sulfur coated slow-released fertilizer on canopy structure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 471.
- [15] 罗一鸣, 肖立中, 潘圣刚, 等. 香稻专用肥对香稻光合物质生产特征的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(1): 28.
- [16] LUO Y M, XIAO L Z, PAN S G, *et al.* Effects of special fertilizer for aromatic rice on characteristics of photosynthesis and matter production of aromatic rice [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(1): 28.
- [17] EFTHIMIADOU A, BILALIS D, KARKANIS A, *et al.* Combined organic/inorganic fertilization enhance soil quality and increased yield, photosynthesis and sustainability of sweet maize crop [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(9): 722.
- [18] 李旭铮, 李援农, 邹奇芳, 等. 缓释肥配施对夏玉米灌浆特性的影响[J]. 节水灌溉, 2022, (8): 84.
- [19] LI X Z, LI Y N, ZOU Q F, *et al.* Effects of combined application of slow-release fertilizer on the filling characteristics of summer maize [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022, (8): 84.
- [20] 张军, 胡川, 周起晖, 等. 减氮及有机肥替代对旱地冬小麦干物质积累、转运、分配和产量的影响[J]. 作物学报, 2025, 51

(1):207.

ZHANG J, HU C, ZHOU Q H, *et al.* Effects of nitrogen reduction and organic fertilizer substitution on dry matter accumulation, translocation, distribution, and yield of dryland winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(1): 207.

[16] 易 媛, 张会云, 刘东涛, 等. 不同播期下春季追肥方式对冬小麦产量及群体性状的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (8): 158.

YI Y, ZHANG H Y, LIU D T, *et al.* Effects of spring top-dressing on grain yield and population characteristics of winter wheat at different sowing dates [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (8): 158.

[17] 王 犇, 任开明, 马尚宇, 等. 不同类型肥料对稻茬弱筋小麦产量与品质的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(4): 163.

WANG B, REN K M, MA S Y, *et al.* Effect of different types of fertilizers on yield and quality of weak gluten wheat from rice stubble [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(4): 163.

[18] 郭 婷, 门 杰, 卢萍萍, 等. 河北省黑龙港区有机肥替代氮肥对小麦产量形成及土壤微生物群落的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024, (8): 119.

GUO T, MEN J, LU P P, *et al.* Effect of organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer on wheat yield formation and soil microbial community in Heilonggang district, Hebei Province [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, (8): 119.

[19] 耿若鑫, 黑泽文, 油伦成, 等. 华北小麦施用脲铵氮肥实现轻简施肥的可行性及技术措施[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1103.

GENG R X, HEI Z W, YOU L C, *et al.* Availability and technology of using urea-ammonium fertilizer to realize nitrogen reduction and simplified fertilization in wheat production of North China Plain [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(6): 1103.

[20] 胡 峰, 张运红, 毛家伟, 等. 不同专用肥对豫北小麦产量、经济效益和养分吸收的影响[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(8): 74.

HU F, ZHANG Y H, MAO J W, *et al.* Effects of different wheat special fertilizers on yield, economic benefit and nutrient uptake of wheat in northern Henan [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(8): 74.

[21] 王 敏, 毛 航, 姜兰芳, 等. 小麦专用肥配施改良剂对旱地小麦产量、品质及肥水效率的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(5): 1044.

WANG M, MAO H, JIANG L F, *et al.* Effects of wheat special fertilizers combined with modifier on yield, quality, and fertilizer and water efficiency of wheat in dry land [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 1044.