

施氮对郑麦 366 光合速率、花后干物质积累及产量的影响

张素瑜^{1,2} 岳俊芹¹ 李向东¹ 靳海洋¹ 任德超² 杨明达² 邵运辉¹
王汉芳¹ 方保停¹ 张德奇¹ 时艳华¹ 秦峰¹ 程红建¹

(¹河南省农业科学院小麦研究所/农业农村部中原地区作物栽培科学观测实验站/河南省小麦产量—品质协同提升工程研究中心, 450002, 河南郑州; ²商丘市农林科学院, 476000, 河南商丘)

摘要 通过2年大田试验, 分析不同施氮措施对郑麦366花后旗叶相对叶绿素含量(SPAD)、光合速率、花后干物质积累及产量的影响, 探究最佳施氮量和施氮方式。设置4个施氮处理, 分别为不施氮(N₀)、基施纯氮210 kg/hm²(N₂₁₀)、基施纯氮150 kg/hm²+拔节期追施纯氮60 kg/hm²(N₁₅₀₊₆₀)、基施纯氮150 kg/hm²+拔节期追施纯氮120 kg/hm²(N₁₅₀₊₁₂₀)。结果表明, 与其他氮肥处理相比, 2018-2019、2019-2020年度N₀处理下灌浆期旗叶净光合速率、灌浆后期旗叶SPAD、花后干物质积累对籽粒产量的贡献率、千粒重和产量均显著降低。与N₂₁₀处理相比, N₁₅₀₊₆₀处理2018-2019年度灌浆末期小麦旗叶SPAD、花后干物质积累对籽粒产量的贡献率、千粒重及产量分别提高12.9%、9.7%、6.5%、1.6%, 2019-2020年度分别提高16.3%、27.2%、6.3%、10.0%。与N₁₅₀₊₁₂₀处理相比, N₁₅₀₊₆₀处理显著降低2018-2019年度灌浆末期冬小麦的旗叶SPAD、灌浆期旗叶净光合速率, 但2019-2020年度差异不显著, N₁₅₀₊₆₀处理显著提高2018-2019年度冬小麦的穗粒数、产量及2年的氮肥偏生产力。综合考虑小麦净光合效率、产量及氮肥生产效率, N₁₅₀₊₆₀处理是更适宜豫北平原的施氮方式。

关键词 小麦; 氮肥; 光合速率; 产量; 氮肥偏生产力

氮素对小麦生长发育及产量形成影响显著, 合理的氮肥运筹有利于建立良好的小麦群体结构, 促进植株充分利用光、热、水、肥资源, 改善叶片光合性能, 促进光合产物积累, 提高籽粒产量^[1-3], 改善小麦品质^[4]。小麦籽粒产量是花前和花后光合产物共同作用的结果。前人^[2,5-6]研究指出, 增施氮肥可增加干物质转移量, 但施氮量过高时则不利于干物质转移; 小麦产量的形成既受花前贮藏物质的调节, 又受花后光合能力的限制^[1-3], 但不同基因型^[3]和不同环境下小麦光合特性、同化物转运量有较大差异^[1-3,5-7]。有学者^[2]研究发现, 增施氮肥可促进花前同化物向籽粒中分配, 也有研究^[3]认为, 随着氮肥施用量增加, 花后同化物对籽粒产量的贡献率先增后减。相比于氮肥全部基施, 氮肥分施及适当提高追氮量对冬小麦生长、产量及品质的促进作用已被广泛证实。并且适当增加追氮量对强筋小麦生长的调控作用更大^[8]。前人关于施氮量、追氮量及比例对小麦产量、干物质积累和氮素利用效率等方面研究较多, 但大多是在增加后期追氮量^[1-3]或总施氮量一定,

调整基肥和追肥比例^[9]条件下研究, 并且由于地力条件、生态区域和氮肥利用效率等方面的差异, 不同研究结果之间存在很大差异。如陈琛等^[10]通过对强筋小麦镇麦18干物质积累及产量的研究认为, 施氮量240 kg/hm² (基肥和追肥比例为5:5) 是江苏淮南麦区红皮强筋小麦适宜的施氮措施; 李亚静等^[11]对强筋冬小麦氮素积累及氮肥利用效率的研究指出, 180 kg/hm² 是冀东平原强筋小麦生产适宜的施氮量; 而李雪萌等^[12]在相同区域研究则认为, 冀东平原强筋小麦种植较适宜的施氮量为210 kg/hm²。随着人们生活水平不断提高, 人们对小麦品质也有了更高要求, 强筋小麦的市场需求量也在逐步加大。前人^[10-14]关于施氮措施对强筋小麦干物质积累转运特征、产量、氮素利用效率的研究多集中在江苏、河北和山东等地区, 而关于豫北区域的研究较少, 还不能广泛指导该区域强筋小麦的栽培生产。为此, 本研究在前人研究的基础上, 通过减少前期基施氮量, 增加后期追氮量, 选用强筋小麦品种郑麦366为供试材料, 研究不同施氮措施对花后旗叶相对叶绿素含量

作者简介: 张素瑜, 主要从事作物栽培生理研究, E-mail: 729401747@qq.com

李向东为通信作者, 主要从事作物优质高产绿色高效栽培研究, E-mail: hnlxd@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2300800); 河南省现代农业产业技术体系建设专项(HARS-22-01-G5); 河南省农业科学院自主创新项目(2023ZC001); 河南省农业科学院科技创新团队

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-10-08; 网络出版日期: 2024-03-27

(SPAD)、旗叶光合速率、花前干物质转运及花后干物质积累对籽粒产量贡献率的影响,探讨不同施氮方式对强筋小麦生长发育的影响及其增产机理,为豫北地区强筋小麦实现高产高效生产提供理论指导和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年10月-2020年6月在河南现代农业研究开发基地(河南省新乡市平原新区,113°41'E, 35°00'N)进行,该地属暖温带大陆性

季风气候,近30年(1991-2020年)年均气温14.4℃,年均降水量566.2 mm。图1为2个小麦生育年度试验区气温及降水量变化,2018年10月1日至2019年6月3日平均气温为9.6℃,累计降水量76.6 mm,日照时数1230.9 h;2019年10月1日至2020年6月3日平均气温为10.6℃,累计降水量195.3 mm,日照时数1363.4 h。2019-2020年度,5月中上旬发生一次较大范围的降水(5月6日-5月10日期间累计降水量为39.4 mm),加之在5月初进行了一次75 mm的灌溉,导致冬小麦在灌浆中后期发生不同程度的倒伏,对籽粒灌

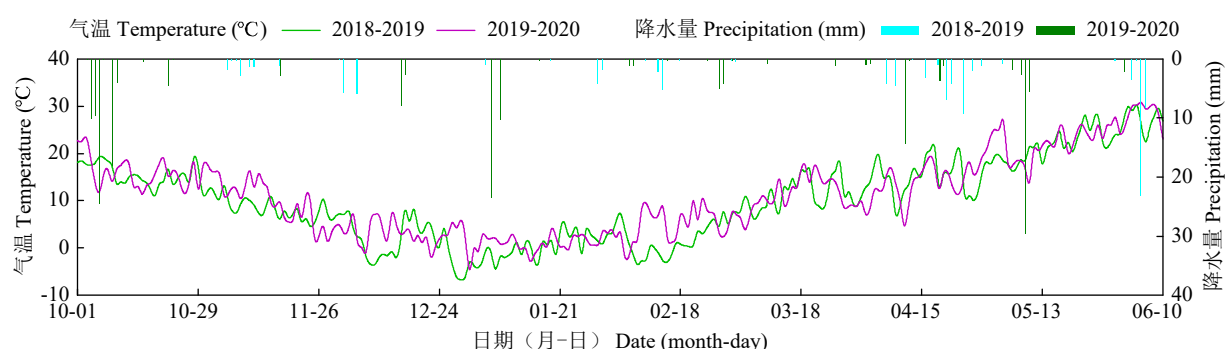


图1 小麦生育期试验区气温及降水量

Fig.1 Temperature and precipitation during wheat growth period

浆及最终产量产生一定的影响。

2018年试验地土壤基础肥力为有机质10.74 g/kg、全氮0.47 g/kg、碱解氮60.22 mg/kg、有效磷86.70 mg/kg、速效钾267.70 mg/kg;2019年试验地土壤基础肥力为有机质10.39 g/kg、全氮0.47 g/kg、碱解氮58.59 mg/kg、有效磷86.30 mg/kg、速效钾262.11 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,以河南省农业科学院小麦研究所选育的强筋小麦品种郑麦366(国审麦2005003)为供试材料,设置4个施氮水平,分别为不施氮(N_0)、基施纯氮210 kg/hm²(N_{210})、基施纯氮150 kg/hm²+拔节期追施纯氮60 kg/hm²(N_{150+60})和基施纯氮150 kg/hm²+拔节期追施纯氮120 kg/hm²($N_{150+120}$),每个处理3次重复,各小区面积15 m²。试验区基施磷肥(P_2O_5)105 kg/hm²和钾肥(K_2O)75 kg/hm²,小麦生育期田间管理措施一致。分别于2018年10月17日和2019年10月19日播种,2年的基本苗分别为258万株/hm²和264万株/hm²,次年6月初各小区全部收获测产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 SPAD 采用日产美能达公司生产的SPAD-502型叶绿素计,2018-2019、2019-2020年度均于小麦花期、灌浆中期、灌浆末期每个小区测定10片旗叶,选取叶片最宽处测定SPAD值,求平均值。
1.3.2 旗叶净光合速率(P_n) 采用美国PP SYSTEMS公司中国总部汉莎科学仪器有限公司生产的CIRAS-3便携式光合仪于小麦花期和灌浆期测定小麦旗叶 P_n 。

1.3.3 干物质转运 于小麦花期和成熟期取样,分别测定样品茎鞘、叶片、穗轴+颖壳、籽粒(成熟期)的干物质质量,计算出不同处理下花前同化物转运量及花后干物质积累量,计算公式如下:

花前同化物转运量(kg/hm²) = 花期干重(kg/hm²) - 成熟期营养器官干重(kg/hm²);

花后干物质积累量(kg/hm²) = 成熟期干重(kg/hm²) - 花期干重(kg/hm²);

花前干物质转运对籽粒产量贡献率(%) = 花前同化物转运量(kg/hm²) / 产量(kg/hm²) × 100;

花后干物质积累对籽粒产量贡献率(%) = 花后干物质积累量(kg/hm²) / 产量(kg/hm²) × 100。

1.3.4 产量及其构成因素 收获前田间测定小麦 1 m 双行的穗数及小麦穗粒数，收获时小区实打实收，折算出单位面积产量。

1.3.5 氮肥偏生产力 氮肥偏生产力^[13] (kg/kg) = 产量 (kg/hm²) / 施氮量 (kg/hm²)；

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) (kg/hm²) / 施氮量 (kg/hm²)。

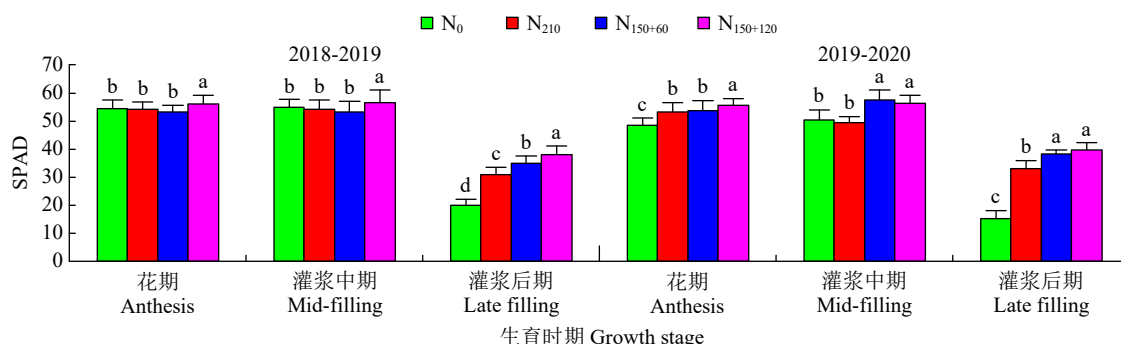
1.4 数据处理

采用 Excel 整理数据，采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验，采用 Excel 和 SigmaPlot 14.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对小麦 SPAD 的影响

由图 2 可知，小麦花期至灌浆后期，N₁₅₀₊₁₂₀ 处理的 SPAD 均处于较高水平，且显著高于 N₂₁₀ 和 N₀ 处理。小麦花期，N₁₅₀₊₆₀ 处理的 SPAD 与 N₂₁₀ 处理间差异不显著。灌浆后期，N₁₅₀₊₆₀ 处理的 SPAD 则显著高于 N₂₁₀ 处理，2018-2019 和 2019-2020 年度分别提高了 12.9% 和 16.3%，说明氮肥后移有利于延缓叶片衰老；灌浆后期 N₀ 处理的 SPAD 显著低于其他氮肥处理。从小麦灌浆中期至灌浆后期，



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same stage ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同施氮处理对小麦旗叶 SPAD 的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen application rates on SPAD of wheat flag leaf

不同处理下小麦旗叶的 SPAD 下降幅度表现为 N₀ > N₂₁₀ > N₁₅₀₊₆₀ > N₁₅₀₊₁₂₀，2 个生长年度下，N₀ 处理的下降幅度分别为 63.6% 和 69.6%。

2.2 不同施氮处理对小麦 P_n 的影响

由图 3 可知，小麦灌浆中期，与 N₀ 处理相比，施氮处理的旗叶 P_n 显著提高；2018-2019 年度，N₁₅₀₊₁₂₀ 处理旗叶 P_n 显著高于 N₁₅₀₊₆₀ 和 N₂₁₀ 处理，N₁₅₀₊₆₀ 和 N₂₁₀ 处理间差异则未达显著水平；2019-2020 年度，灌浆中期 N₁₅₀₊₁₂₀ 与 N₁₅₀₊₆₀ 处理间差异

不显著，但均显著高于 N₂₁₀ 处理，这可能与灌浆期 N₁₅₀₊₆₀ 与 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理间 SPAD 差异不显著，但显著高于 N₂₁₀ 处理有关（图 2）。2018-2019 和 2019-2020 年度，从小麦花期到灌浆中期，旗叶 P_n 的下降幅度表现为 N₀ 处理最大，分别下降了 29.9% 和 13.1%；N₁₅₀₊₆₀ 处理最小，分别下降了 7.7% 和 2.8%；N₁₅₀₊₁₂₀ 处理则分别下降了 8.8% 和 11.3%，主要是因为 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理扬花期旗叶 P_n 在 2 个生长年度均显著高于 N₁₅₀₊₆₀ 处理，而灌浆期光合值差值较小，使 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理下旗叶 P_n 的下降幅度较大。

2.3 不同施氮处理对小麦干物质转运的影响

由表 1 可知，氮肥处理对小麦花前干物质转运对籽粒产量贡献率和花后干物质积累对籽粒产量贡献率的影响均达显著水平。与其他处理相比，追氮处理 (N₁₅₀₊₆₀、N₁₅₀₊₁₂₀) 花后干物质积累对籽粒产量贡献率显著提高，2018-2019 年度，N₁₅₀₊₆₀ 和 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理间花后干物质积累对籽粒产量的贡献率差异不显著，2019-2020 年度，N₁₅₀₊₁₂₀ 处理的花后干物质积累对籽粒产量贡献率显著高于 N₁₅₀₊₆₀ 处理；与其他处理相比，2 个生长年度 N₀ 处理的花

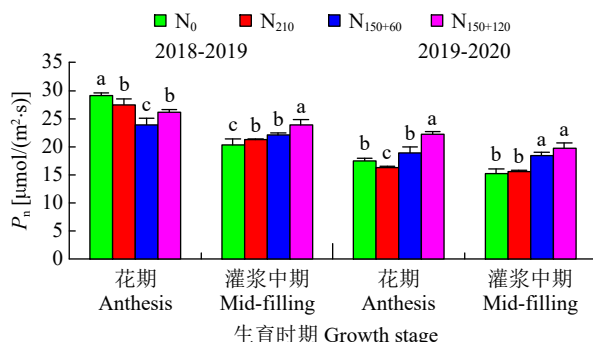


图 3 不同施氮处理对小麦 P_n 的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen application rates on P_n of wheat

后干物质积累对籽粒产量贡献率均显著降低；另处理的花后干物质积累量和花后干物质积累对籽粒产量贡献率均显著高于 N₂₁₀ 处理。外,总施氮量一定的条件下(N₂₁₀和 N₁₅₀₊₆₀),N₁₅₀₊₆₀

表 1 不同施氮处理对小麦干物质转运的影响
Table 1 Effects of different nitrogen application rates on translocation of dry matter in wheat

年度 Year	处理 Treatment	花前干物质转运量 Transport amount of dry matter before anthesis (kg/hm ²)	花后干物质积累量 Accumulation of dry matter after anthesis (kg/hm ²)	花前干物质转运 对籽粒产量贡献率 Contribution rate of dry matter transport before anthesis to grain yield (%)	花后干物质积累 对籽粒产量贡献率 Contribution rate of dry matter accumulation after anthesis to grain yield (%)
2018-2019	N ₀	3208.81a	5878.42c	35.31a	64.69c
	N ₂₁₀	1573.61b	8129.11b	16.22b	83.78b
	N ₁₅₀₊₆₀	801.86c	9057.55a	8.13c	91.87a
	N ₁₅₀₊₁₂₀	782.73c	8745.29ab	8.22c	91.78a
2019-2020	N ₀	4111.85b	607.53d	87.13a	12.87d
	N ₂₁₀	4744.74a	3096.91c	60.51b	39.49c
	N ₁₅₀₊₆₀	4291.67b	4332.47b	49.76c	50.24b
	N ₁₅₀₊₁₂₀	3281.76c	5352.69a	38.01d	61.99a

同列同年度数值后不同字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)，下同。
Different letters after the values of the same year in the same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level, the same below.

2.4 不同施氮处理对小麦产量及其构成因素的影响
由表 2 可知，不同氮肥处理显著影响小麦的产量及其构成因素。与施氮处理相比，N₀处理的产量和千粒重均显著降低，2019-2020 年度，N₀处理穗数和穗粒数也显著降低。N₁₅₀₊₆₀和 N₁₅₀₊₁₂₀处理穗数和千粒重差异不显著。

表 2 不同施氮处理对小麦产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of different nitrogen application rates on yield and its components in wheat

年度 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	穗数 Spike number (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grains of per spike	千粒重 1000-grain weight (g)
2018-2019	N ₀	9087.23c	624.80a	42.13b	39.74c
	N ₂₁₀	9702.72ab	639.20a	43.21a	41.96b
	N ₁₅₀₊₆₀	9859.41a	618.93b	42.23b	44.68a
	N ₁₅₀₊₁₂₀	9528.02b	611.33b	41.53c	45.09a
2019-2020	N ₀	4719.38c	419.17b	37.96c	36.32c
	N ₂₁₀	7841.65b	599.83a	40.39b	38.23b
	N ₁₅₀₊₆₀	8624.14a	590.51a	42.92a	40.61a
	N ₁₅₀₊₁₂₀	8634.45a	590.25a	42.55a	41.13a

2018-2019 年度，与 N₂₁₀ 处理相比，N₁₅₀₊₆₀ 处理的产量明显提高，千粒重显著提高，穗数和穗粒数则显著降低；与 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理相比，N₁₅₀₊₆₀ 处理的产量和穗粒数均显著提高，穗数和千粒重间的差异则未达显著水平。2019-2020 年度，与 N₂₁₀ 处理相比，N₁₅₀₊₆₀ 和 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理的产量、穗粒数和千粒重显著提高，而 N₁₅₀₊₆₀ 和 N₁₅₀₊₁₂₀ 处理间产量、穗粒数和千粒重的差异则未达显著水平。

2.5 不同施氮处理对小麦氮肥利用效率的影响
由表 3 可知，不同处理下小麦的氮肥偏生产力与氮肥农学效率均表现为 N₁₅₀₊₆₀ > N₂₁₀ > N₁₅₀₊₁₂₀，且 2018-2019 和 2019-2020 年度 N₁₅₀₊₆₀ 处理下小麦

表 3 不同施氮处理对小麦氮肥利用效率的影响
Table 3 Effects of different nitrogen application rates on nitrogen use efficiency of wheat

处理 Treatment	2018-2019		2019-2020	
	氮肥偏生产力 N partial productivity	氮肥农学效率 N agronomy efficiency	氮肥偏生产力 N partial productivity	氮肥农学效率 N agronomy efficiency
N ₂₁₀	46.20a	2.93b	37.34b	14.87b
N ₁₅₀₊₆₀	46.95a	3.68a	41.07a	18.59a
N ₁₅₀₊₁₂₀	35.29b	1.63c	31.98c	14.50b

的氮肥偏生产力分别较 $N_{150+120}$ 处理显著提高 33.0% 和 28.4%；与 N_{210} 处理相比，2019–2020 年度 N_{150+60} 处理小麦的氮肥偏生产力显著提高 9.9%。

3 讨论

氮肥后移补偿效应优于氮肥全部基施，能显著减轻逆境对光合器官的破坏并改善旗叶光合性能^[9]，增施氮肥或后期适当增加追氮量可提高旗叶 SPAD、旗叶 P_n 、气孔导度、蒸腾速率^[1,3,14-15]，减缓花后旗叶 P_n 的下降幅度^[9,16]。丛孟菲等^[17]指出，氮和磷减施为 $N\ 240\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 120\ kg/hm^2$ 时，灌浆期冬小麦仍保持较高的株高和旗叶 SPAD，且维持高产，但过高的施氮量导致小麦生育后期旗叶衰老加快， P_n 迅速下降^[16]，产量^[18]和氮肥利用率^[19]也下降。本研究中， N_0 处理下，从花期到灌浆期，旗叶 P_n 显著下降，灌浆后期 SPAD 显著下降，且 P_n 和 SPAD 的降低幅度均最大。 N_{150+60} 和 $N_{150+120}$ 处理下，灌浆中期旗叶 P_n 、灌浆后期旗叶 SPAD 较一次性基施（ N_{210} ）处理提高，随着追氮量的增加，大部分时期 $N_{150+120}$ 处理旗叶 SPAD 和 P_n 较 N_{150+60} 处理表现为增加趋势，说明增加追氮量可以增加绿色叶面积，防止旗叶早衰，促进旗叶对光能的吸收，提高单位叶面积 P_n ，延长叶片光合功能期。

增施氮肥或后期适当增加追氮量可以提高同化物向籽粒的运转效率，促进籽粒干物质的合成与积累^[3,20]，且千粒重随着追氮时期的后移而增加^[21]，随追氮量的增加表现为先增加后降低的趋势^[1,2]，但施氮过多则不利于花前干物质转运和籽粒干物质的积累^[3,5,6,21]。本研究中，与其他处理相比， N_0 处理下花后干物质积累对籽粒产量贡献率显著降低，产量和千粒重均显著降低。与 N_{210} 处理相比， N_{150+60} 和 $N_{150+120}$ 处理下花后干物质积累对籽粒产量贡献率和千粒重显著提高；随着追氮量的增加， $N_{150+120}$ 处理花前干物质转运量表现为降低趋势，花后干物质积累对籽粒产量贡献率表现为增加趋势，这与 $N_{150+120}$ 处理旗叶 P_n 较高且功能期较长密切相关。 $N_{150+120}$ 处理千粒重较 N_{150+60} 处理表现为增加趋势，但差异未达显著水平。马冬云等^[7]研究指出，花前贮藏物质对粒重的贡献率为 22.16%~48.11%，而花后同化物质的贡献率为 51.88%~77.84%；另外在高氮处理下，花前转运量和转运率均降低，但花后同化量和花后贡献率均增加。本研究认为，在一定范围内，拔节期追氮和适当增加追氮量可提高花后干

物质积累量及花后干物质积累对籽粒产量贡献率，且花后干物质积累对籽粒产量的贡献较大，有利于促进小麦高产稳产，这与前人^[3]研究结果一致。从氮肥生产效率来看， N_{150+60} 处理较 N_{210} 处理表现为增加趋势，主要是因为总施氮量相同，但 N_{150+60} 处理旗叶功能期较长，花后光合效率提高，花后干物质积累量增加，显著提高小麦千粒重，使产量增加；与 $N_{150+120}$ 处理相比， N_{150+60} 处理的肥料利用效率也表现为显著提高，主要是因为 $N_{150+120}$ 处理的氮肥投入量增加 28.6%，但产量没有显著提高，2018–2019 年度 $N_{150+120}$ 处理的产量甚至显著降低（表 2）。综合考虑小麦产量和氮肥生产效率，本研究推荐 N_{150+60} 处理为试验区域较适宜的施氮方式。

4 结论

总施氮量一定的条件下（ N_{210} 和 N_{150+60} 处理）， N_{150+60} 处理可以延缓旗叶衰老，提高旗叶 P_n 和花后干物质积累及对籽粒产量贡献率，提高千粒重和产量；氮肥基施量相同时，增加追氮量（ N_{150+60} 和 $N_{150+120}$ ）千粒重和产量均没有显著提高，氮肥偏生产力显著降低。综合考虑小麦高产稳产及氮肥高效利用， N_{150+60} 处理是更适宜本区域推广使用的施氮方式。

参考文献

- [1] 薛丽华, 赵连佳, 陈兴武, 等. 施氮量对滴灌冬小麦光合特性、产量及氮素利用效率的影响. 中国农学通报, 2018, 34(10): 11-16.
- [2] 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、分配与转运的影响. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078-1086.
- [3] 史辛凯, 于振文, 赵俊晔, 等. 施氮量对高产小麦光合特性、干物质积累分配与产量的影响. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 713-721.
- [4] Wang M, Shen Q R, Xu G H, et al. Chapter one-new insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells. International Review of Cell and Molecular Biology, 2014, 310: 1-37.
- [5] 马东辉, 王月福, 周华, 等. 氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 847-851.
- [6] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 55-59.
- [7] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响. 作物学报, 2008, 34(6): 1027-1033.
- [8] 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. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1249-1259.
- [9] 武文明, 陈洪俭, 李金才, 等. 氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响. 作物学报, 2012, 38(6): 1088-1096.

- [10] 陈琛, 刘家俊, 邓垚, 等. 氮肥运筹对强筋小麦镇麦 18 产量及干物质生产的影响. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 368-376.
- [11] 李亚静, 郭振清, 杨敏, 等. 施氮量对强筋小麦氮素积累和氮肥农学利用效率的影响. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 343-350.
- [12] 李雪萌, 杨梅, 秦保平, 等. 施氮量对强筋小麦物质积累与籽粒产量的影响. 麦类作物学报, 2023, 43(5): 609-622.
- [13] 王慧, 刘大同, 朱冬梅, 等. 氮肥调控对稻茬晚播小麦产量、品质及氮素利用的影响. 麦类作物学报, 2023, 43(7): 873-882.
- [14] 孙旭生, 林琪, 李玲燕, 等. 氮素对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 840-844.
- [15] 赵海波, 林琪, 孙旭生, 等. 氮磷配施对济麦 22 花后光合特性及产量的影响. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 663-667.
- [16] 杨明达, 马守臣, 杨慎骄, 等. 氮肥后移对抽穗后水分胁迫下冬小麦光合特性及产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3315-3321.
- [17] 丛孟菲, 赖宁, 胡洋, 等. 化肥减施对滴灌冬小麦灌浆期光合生理特性的影响. 中国土壤与肥料, 2022(5): 43-50.
- [18] 牟海萌, 孙丽芳, 王壮壮, 等. 施氮量和种植密度对两冬小麦品种抗倒性能和籽粒产量的影响. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2863-2879.
- [19] 刘世洁, 杨习文, 马耕, 等. 灌水和施氮对冬小麦根系特征及氮素利用的影响. 作物学报, 2023, 49(8): 2296-2307.
- [20] 李鹏, 贾永红, 张金汕, 等. 氮肥追施比例对匀播冬小麦光合特性及产量的影响. 麦类作物学报, 2021, 41(8): 1015-1022.
- [21] 朱新开, 郭凯泉, 郭文善, 等. 氮肥运筹比例对稻田套播强筋小麦子粒品质和产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 515-521.

Effects of Nitrogen Application on Photosynthetic Rate, Dry Matter Accumulation after Anthesis and Yield of Zhengmai 366

Zhang Suyu^{1,2}, Yue Junqin¹, Li Xiangdong¹, Jin Haiyang¹, Ren Dechao²,
Yang Mingda², Shao Yunhui¹, Wang Hanfang¹, Fang Baoting¹,
Zhang Deqi¹, Shi Yanhua¹, Qin Feng¹, Cheng Hongjian¹

(¹Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in Central Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Henan Province Engineering Research Center of Wheat Yield-Quality Simultaneous Improvement, Zhengzhou 450002, Henan, China;

²Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract Field experiments were conducted with the strong gluten wheat variety Zhengmai 366 for two consecutive years in order to analyze the effects of different nitrogen application methods on flag leaf SPAD, photosynthetic rate, dry matter accumulation after anthesis, and grain yield. Four nitrogen application treatments were set: no nitrogen treatment (N_0), basal nitrogen 210 kg/ha (N_{210}), basal nitrogen 150 kg/ha + topdressing nitrogen 60 kg/ha at jointing stage (N_{150+60}), basal nitrogen 150 kg/ha + topdressing nitrogen 120 kg/ha at jointing stage ($N_{150+120}$). The result showed that compared with other nitrogen application treatments, the photosynthetic rate of flag leaf, SPAD at the filling stage, ratio of grain dry matter at post-anthesis, 1000-grain weight and final yield of N_0 treatment decreased significantly in both 2018-2019 and 2019-2020. Compared with N_{210} treatment, SPAD at late filling stage, contribution rate of dry matter accumulation after anthesis to grain yield, 1000-grain weight and yield of N_{150+60} treatment increased by 12.9%, 9.7%, 6.5%, 1.6% in 2018-2019, and those were 16.3%, 27.2%, 6.3%, and 10.0%, respectively in 2019-2020. Compared with $N_{150+120}$ treatment, N_{150+60} treatment significantly decreased SPAD at late filling stage, photosynthetic rate at filling stage in 2018-2019, but not significantly affect these physiological parameters of winter wheat at filling stage in 2019-2020. N_{150+60} treatment significantly increased the number of grains per spike and yield in 2018-2019, and N partial productivity in both two years when compared to $N_{150+120}$. Considering photosynthetic rate, yield and nitrogen production efficiency, N_{150+60} treatment is a more suitable nitrogen application method for North Henan Plain.

Key words Wheat; Nitrogen fertilizer; Photosynthetic rate; Yield; Nitrogen partial productivity