

拔节前补灌追氮对小麦叶片干物质积累量和产量的影响

赵永满 李瑞奇 王红光

(河北农业大学农学院/省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室/河北省作物生长调控实验室, 071001, 河北保定)

摘要 为探究浇拔节水前小水量灌溉并追氮对小麦叶片干物质积累量和产量的影响, 于 2024–2025 年小麦生长季, 以济麦 22 为供试材料, 设置春 2 叶 (T2)、春 3 叶 (T3) 和春 4 叶 (T4) 露尖 3 个时期, 每个时期下设 7.5 (M1)、15.0 (M2) 和 22.5 mm (M3) 3 个灌水量, 以常规灌水为对照 (CK), 各处理在拔节期和开花期分别灌水 60 mm, 研究不同水氮运筹方案对小麦叶面积、叶面积指数 (LAI)、叶绿素相对含量 (SPAD 值)、干物质积累量和籽粒产量的影响。结果表明, 同一补灌水量条件下, 随生育时期的推迟, 小麦上 3 叶叶面积显著降低, LAI 和干物质积累量呈先升后降的趋势, 上 3 叶花后 SPAD 值无显著变化, 穗数和籽粒产量也呈先升后降的趋势, 但均高于 CK 处理。同一补灌时期条件下, 小麦叶面积、LAI、干物质积累量、穗数、千粒重及籽粒产量均随灌水量的增加呈上升趋势, 且均高于 CK 处理, M3 处理的籽粒产量较 CK 增加 28.54%, 不同灌水量处理间 SPAD 值无显著差异。灌水追氮时期和灌水量对穗数和籽粒产量的影响存在显著的互作效应。综上, 在拔节期灌溉基础上于春 3 叶露尖时灌水 22.5 mm 并追氮, 能够有效增加穗数和 LAI, 实现小麦增产。

关键词 小麦; 灌水时期; 灌水量; 叶片干物质积累量; 籽粒产量

伴随工业化和城镇化进程加速, 耕地面积持续缩减, 不断提高小麦单产是保障国家粮食安全的重要途径^[1-2]。水氮调控是构建小麦高产群体结构的关键措施, 返青至拔节阶段是小麦营养和生殖器官建成并进的时期, 此阶段的水肥供应时期和数量对茎蘖消长、叶片大小和幼穗发育均有潜在的影响, 因此, 探索优化返青至拔节阶段的水氮运筹方案对进一步提高小麦产量有重要意义。

春季灌溉追氮时期对小麦叶面积指数 (LAI) 和产量有显著影响。杨林林等^[3]研究表明, 在返青至拔节阶段, 返青期灌溉处理的 LAI 增长率为 152%, 而返青期末灌溉处理的 LAI 增长率仅为 114%。何进尚等^[4]研究发现, 在返青后 7 d 增加 1 次 30 mm 的小水量灌溉追氮相比常规仅拔节期灌水 60 mm, 能显著提高小麦产量。杨永安等^[5]研究也发现, 返青期和拔节期灌 2 次水处理与仅拔节期灌 1 次水处理相比, 小麦产量显著增加。何璐^[6]研究发现, 在起身期灌水追氮能有效促进上 3 叶 (旗叶、倒 2 叶和倒 3 叶) 生长, 显著提升开花期 LAI, 为干物质的积累奠定基础。李晓爽等^[7]将拔节水推迟至拔节后 5 d, 显著提高了花前同化物向籽粒的转运量, 增加了产量。但过度推迟会导

致产量显著下降, 孙明清等^[8]研究证实, 将灌水时期由拔节期推迟至拔节后 10 d, 产量降低 11.5%。

灌水量也会影响小麦干物质积累量和产量。研究^[9]表明, 适当增加灌水量有利于提高小麦的叶绿素相对含量 (SPAD 值), 还有助于促进小麦干物质积累及其向籽粒的运输, 从而提高产量^[10]。另有研究^[11]发现, 冬小麦单茎干物质积累量会随滴灌量的增加而增加。但灌水量过度增加, 冬小麦的 LAI 和 SPAD 值会呈现降低趋势^[12]。当灌水量超过一定阈值后, 进一步增加灌水量, 旗叶净光合速率和籽粒产量反而会降低^[13]。

受限于春季干旱, 追氮后不及时灌溉对小麦生长发育无促进效果, 所以将春季追氮和灌水完全分离不可行, 上述关于追氮时期和灌水时期的研究也多将二者结合进行。漫灌、渠灌和“小白龙” (农用塑料水带) 灌溉是我国北方麦区长期以来的主要灌溉形式, 其共同的缺点是无法实现小水量均匀灌溉, 生产中匹配追氮的灌水量多在 60 mm 以上。但在每次灌水 60 mm 条件下, 灌水追氮偏早易导致旗叶和倒 2 叶叶面积过大, 偏晚又存在降低穗数和叶片干物质积累量的风险^[6], 在生产实践中最佳的灌溉追氮时期较难把握, 探索

作者简介: 赵永满, 主要从事小麦节水高产技术研究, E-mail: zhaoyongman888@163.com

王红光为通信作者, 主要从事小麦高产栽培理论与技术研究, E-mail: jlwanghongguang@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2301500)

收稿日期: 2025-10-27; 修回日期: 2025-12-02; 网络出版日期: 2026-05-11

新的水氮运筹方案十分必要。近年来水肥一体化灌溉设施在小麦生产中被广泛应用,为小水量均匀灌溉和追氮提供了可行性,因此,本试验基于浅埋滴灌研究了不同叶龄期小水量灌溉追氮的实施效果,旨在为优化麦田水氮运筹方案提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2024–2025 年度冬小麦生长季,在河北省石家庄市藁城区张家庄镇赵庄村 (38.10° N, 114.41° E) 开展试验。试验地位于河北省中南部,该区域属于山前平原区,是河北省典型的高产麦区,土壤类型为砂质壤土,0~200 cm 土层的土壤容重均值达 1.5 g/cm³,田间最大持水量为 28%。播种前 0~40 cm 土层理化性质为有机质 18.9 g/kg、全氮 1.3 g/kg、速效磷 19.2 mg/kg、速效钾 169.4 mg/kg、碱解氮 135.8 mg/kg。冬小麦适宜的播种期为 10 月 6 至 12 日,一般于 11 月下旬至 12 月上旬进入越冬阶段,次年 2 月底至 3 月初开始返青,5 月初进入开花期,6 月 10 至 15 日成熟,春季通常长出 6 片叶。2024–2025 年冬小麦生育期内总降水量为 103.4 mm,播种至越冬期内降水量为 38.2 mm,越冬至返青期内降水量为 5.2 mm,返青至拔节期内降水量为 0.0 mm,拔节至开花期内降水量为 10.9 mm,开花至成熟期内降水量为 49.1 mm。

1.2 试验设计

以济麦 22 为供试材料,采用双因素裂区设计。在拔节期灌水前设置不同时期和不同水量的小水量补灌处理,主区为小水量补灌追氮时期,设春 2 叶 (T2)、春 3 叶 (T3) 和春 4 叶 (T4) 露尖 3 个时期;副区为补灌量,设 7.5 (M1)、15.0 (M2) 和 22.5 mm (M3) 3 个水平,以常规灌水为对照 (CK),各处理在拔节期和开花期分别灌水 60 mm。所有处理均采用浅埋滴灌方式,滴灌带间距为 30 cm,埋深 3~5 cm,滴灌带为侧翼迷宫式,滴头流量 4 L/h。小区面积为 80 m² (10 m×8 m),追氮量均为 120 kg/hm²,共 10 个处理,3 次重复。T2、T3 和 T4 处理的补灌日期分别为 3 月 11 日、3 月 21 日和 4 月 3 日,拔节期灌溉日期为 4 月 8 日。T2、T3、T4 处理和拔节期灌水前 0~100 cm 土层土壤含水量分别为 14.55%、14.11%、12.15%和 11.55%。

夏玉米收获后秸秆还田,施底肥后旋耕 2 次,于 10 月 7 日采用 15 cm 等行距播种,基本苗为 300 万/hm²。全生育期施 N 240 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 和 K₂O 120 kg/hm²,所用肥料为尿素 (含 46% N)、磷酸二铵 (含 18% N、46% P₂O₅) 和氯化钾 (含 60% K₂O),氮肥 50%底施,50%在春季第 1 次小水量灌溉时同步追施,磷肥和钾肥全部底施。2025 年 6 月 15 日收获,其他管理措施同一般高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 单茎绿叶面积与 LAI 分别于上 3 叶 [旗叶 (L6)、倒 2 叶 (L5) 和倒 3 叶 (L4)] 完全展开后 1 周随机选取有代表性的植株 10 株,用直尺分别测量叶长和叶宽,叶长指从叶枕到叶尖的距离,叶宽指叶片最宽处的宽度,每个处理设 3 次重复。计算单茎绿叶面积和 LAI,单茎绿叶面积=叶长×叶宽×0.83, LAI=[单茎绿叶面积 (m²)×每公顷总茎数 (/hm²)]/10000^[6]。

1.3.2 SPAD 值 分别于开花期、花后 10、20 和 28 d 随机选取有代表性的植株 20 株,用 SPAD-502 叶绿素含量测定仪 (柯尼卡美能达,日本) 测定旗叶、倒 2 叶和倒 3 叶的 SPAD 值,试验重复 3 次^[14]。

1.3.3 干物质积累量 于成熟期随机选取有代表性的植株 10 株,每个处理设 3 次重复,分穗、茎和叶 3 部分,先在 105 °C 烘箱中杀青 30 min,而后于 80 °C 烘干至恒重,测得干物质积累量^[6]。

1.3.4 籽粒产量及其构成因素 在灌浆后期,每个小区内选取 1 m 双行进行调查,记录穗数,每个处理设 3 次重复。同时,连续选取 30 个穗,3 次重复,以计算穗粒数。成熟期,在每个小区内挑选长势均匀的 3 m² 植株进行收获,使用小型脱粒机脱粒,风干后称重。从中取出约 50 g 籽粒,采用烘干法测定其含水量,并按 13% 的含水量标准折算籽粒产量^[6]。在每份测产籽粒中,随机抽取 3 份各 1000 粒进行称重,当 3 份样品间的重量差不超过其平均值的 5.0% 时,取其平均值并按 13% 含水量折算,即为千粒重。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Origin 2021 软件整理数据与作图,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 分析数据,各处理结果均取重复值的平均值,标准差基

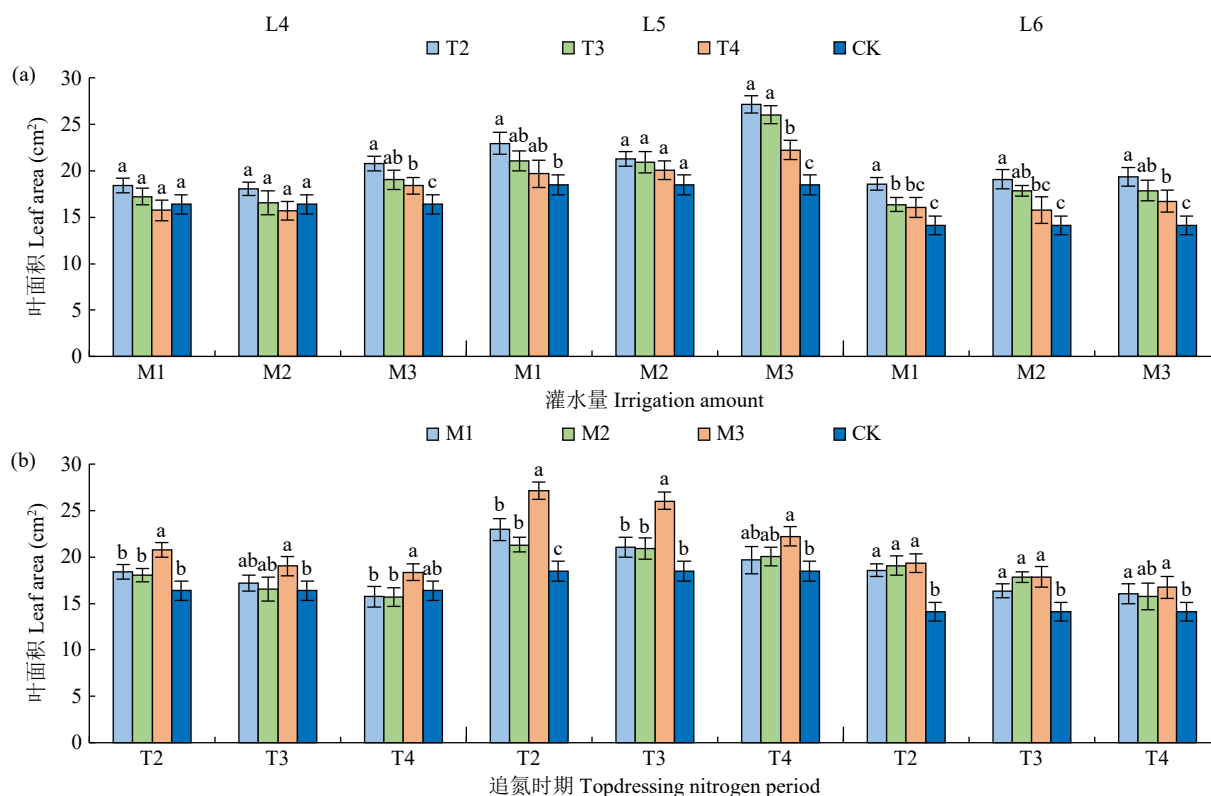
于重复值进行计算。

2 结果与分析

2.1 追氮时期和灌水量对小麦叶面积的影响

由图 1 可知，在同一灌水量条件下，伴随灌水追氮时期的推迟，上 3 叶叶面积总体呈现下降趋势，变化幅度为 4.41%~31.91%。不同叶位之间相比，旗叶面积对水氮时期的响应最为敏感。在

M3 条件下各水氮时期处理间的差异最大，变幅为 10.91%~31.91%，在 M1 和 M2 条件下各水氮时期处理间的变幅分别为 4.08%~24.02%和 4.41%~25.97%（图 1a）。在同一水氮处理时期条件下，灌水量由 7.5 mm 增加至 22.5 mm 时叶面积明显增大，增幅为 3.83%~21.53%，M1 与 M2 之间差异较小（图 1b）。上述结果说明在春 2 叶露尖时进行小水量灌溉并追氮可有效增加叶面积，且增加



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 追氮时期和灌水量对上 3 叶叶面积的影响

Fig.1 Effects of topdressing nitrogen period and irrigation amount on the leaf area of the top three leaves

灌溉量可加强这一促进作用。

2.2 追氮时期和灌水量对小麦叶片干物质积累量的影响

由图 2 可知，在同一灌水量条件下，伴随灌水追氮时期的推迟，上 3 叶叶片干物质积累量均未表现出显著差异，但均高于 CK 处理，增幅为 2.23%~24.91%，说明在拔节期灌水前增加 1 次小水量灌溉追氮有助于提高叶片干物质积累量。不同叶位相比，旗叶叶片干物质积累量对水氮时期的响应最为敏感，变化幅度为 12.93%~24.91%（图 2a）。在同一追氮时期下，伴随灌水量的增加，上 3 叶叶片干物质积累量呈升高趋势，增幅

为 7.14%~12.94%（图 2b）。说明拔节前追氮时适当增加灌溉量可增强对叶片干物质积累量的促进作用。

2.3 追氮时期和灌水量对小麦孕穗期上 3 叶 LAI 的影响

由图 3 可知，在同一灌水量条件下，伴随灌水追氮时期的推迟，上 3 叶 LAI 均呈先升高后降低的趋势，T3 处理最大，处理间变化幅度为 1.94%~47.82%。在 M3 条件下各水氮时期处理间差异最大，变幅为 25.41%~47.82%，M1 条件下各水氮时期处理间的变化幅度为 1.94%~28.14%，M2 条件下为 3.03%~38.24%（图 3a）。在同一灌

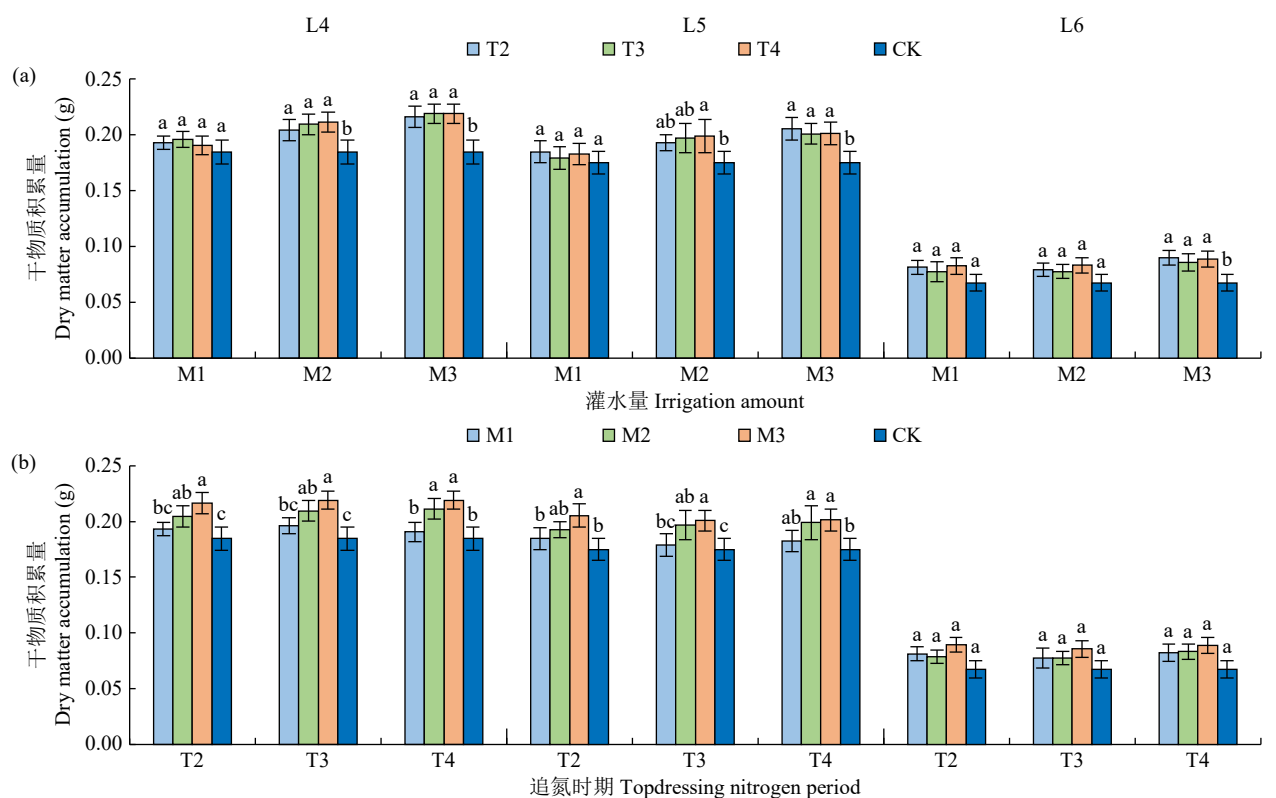


图 2 追氮时期和灌水量对小麦叶片干物质积累量的影响
Fig.2 Effects of topdressing nitrogen period and irrigation amount on wheat leaf dry matter accumulation

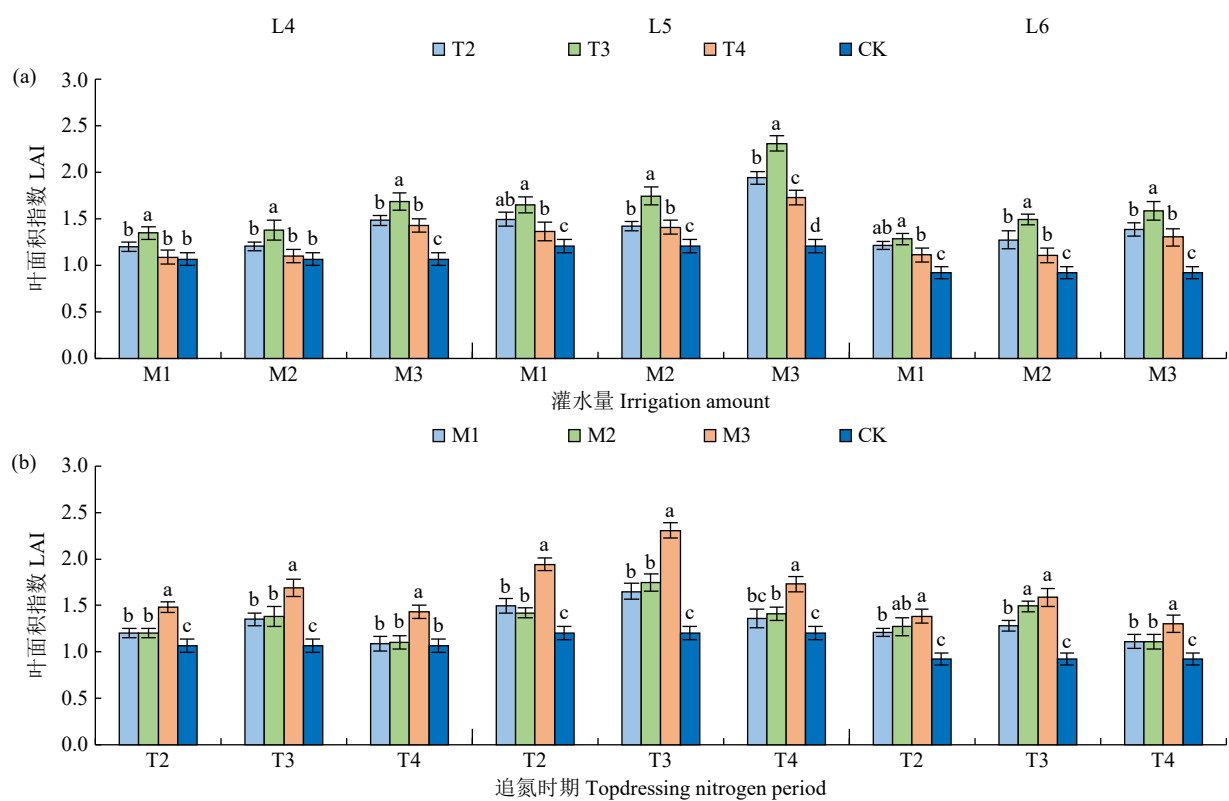


图 3 追氮时期和灌水量对小麦孕穗期 LAI 的影响
Fig.3 Effects of topdressing nitrogen period and irrigation amount on LAI of wheat at the booting stage

水追氮时期条件下，伴随灌水量的增加，上 3 叶 LAI 也呈升高趋势，且均高于 CK 处理。M3 处理

各叶层 LAI 均显著高于 M1，M2 处理下仅旗叶 LAI 显著高于 M1（图 3b）。上述结果说明在春 3 叶露尖灌水追氮对上 3 叶 LAI 有最大的促进效果，且可通过调节追氮时的灌水量灵活调控目标叶层 LAI 的大小。

2.4 追氮时期和灌水量对叶片 SPAD 值的影响

由表 1 可知，同一灌水量条件下，不同灌水追氮时期处理之间，L6 的 SPAD 值在开花期和花

后 10 d 表现为 T2、T3 和 T4 处理显著高于 CK 处理，增幅分别为 8.68%~17.65%、4.83%~11.74%和 6.63%~13.19%，这表明在拔节期灌水前增加小水量灌溉同步追氮有利于延缓倒 3 叶的衰老。相比之下，L4 和 L5 的 SPAD 值在花后各时期均未表现出显著差异。此外，在同一灌水追氮时期条件下，不同灌水量处理之间 L4、L5 和 L6 的 SPAD 值在开花期至花后 28 d 也均无显著差异。

表 1 不同追氮时期和灌水量处理的冬小麦叶片 SPAD 值
Table 1 Leaf SPAD value in winter wheat under different topdressing nitrogen periods and irrigation amounts

处理 Treatment	花后天数 Days after flowering (d)											
	0			10			20			28		
	L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6	L4	L5	L6
M1T2	57.66a	63.07a	63.61a	52.37a	57.93a	58.95a	45.26a	55.29a	57.73a	38.7ab	51.84a	55.58ab
M1T3	56.01a	62.22a	61.83a	52.41a	59.77a	60.67a	44.28a	53.68a	57.88a	41.01a	52.77a	57.37a
M1T4	58.97a	63.53a	61.17a	52.69a	60.32a	59.23a	45.68a	52.85a	57.83a	39.44a	52.00a	56.39a
CK	54.80b	62.08a	61.50a	47.51b	57.91a	59.33a	43.64a	53.14a	55.28b	36.33b	51.18a	53.82b
M2T2	58.12a	60.93a	60.60a	53.58a	57.67a	58.47a	44.32a	53.08a	56.08a	41.24a	51.35a	50.61b
M2T3	57.58a	62.69a	60.79a	53.83a	59.44a	59.22a	45.32a	54.08a	56.08a	39.07ab	51.85a	52.21ab
M2T4	59.74a	60.69a	59.17a	53.79a	56.36a	57.03a	44.65a	53.04a	55.84a	40.74a	50.62a	50.36b
CK	54.80b	62.08a	61.50a	47.51b	57.91a	59.33a	43.64a	53.14a	55.28a	36.33b	51.18a	53.82a
M3T2	59.02a	62.69a	61.35a	54.16a	60.15a	60.06a	45.91a	52.83a	56.37ab	41.06a	50.16a	55.06ab
M3T3	58.69a	63.26a	63.53a	54.55a	61.06a	61.07a	44.41a	52.93a	56.48ab	40.37a	51.82a	55.57ab
M3T4	60.69a	62.26a	62.70a	54.73a	61.36a	61.38a	44.42a	54.39a	57.81a	39.90ab	49.29a	57.02a
CK	54.80b	62.08a	61.50a	47.51b	57.91b	59.33a	43.64a	53.14a	55.28b	36.33b	51.18a	53.82b

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

2.5 追氮时期和灌水量对小麦成熟期干物质积累量的影响

由图 4 可知，在同一灌水量条件下，伴随灌水追氮时期的推迟，单茎干物质积累量呈下降趋势，但处理间差异未达显著水平，群体干物质积累量呈先升高后降低的趋势，处理之间差异显著，变化幅度为 2.03%~28.87%。在 M3 条件下各水氮时期处理之间的差异最大，变化幅度为 16.78%~28.87%，M1 处理下各水氮时期处理之间的变幅为 2.03%~18.36%，M2 处理下为 7.95%~23.66%（图 4a~b）。在同一追氮时期下，单茎和群体干物质积累量均随灌水量的增加呈上升趋势，不同灌水量处理间群体干物质积累量的差异大于单茎干物质积累量的差异（图 4c~d）。上述结果说明在拔节期灌水前增加 1 次小水量灌溉同步追氮可有效促进群体干物质积累，且增加灌溉量可加强这一促进作用，但对单茎干物质积累量影响较小。

2.6 追氮时期和灌水量对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

由表 2 可知，在同一灌水量条件下，随着灌水追氮时期的推迟，籽粒产量和穗数均呈先升高后降低的趋势，处理间变化幅度分别为 2.05%~22.20%和 0.00%~26.50%，差异达到显著水平。千粒重随追氮时期的推迟呈降低趋势，但均高于 CK 处理。各灌水时期处理间穗粒数无显著差异，但均低于 CK 处理。相较于 M1 和 M2，M3 条件下各水氮时期处理间籽粒产量和穗数的差异最大，变化幅度分别为 10.47%~22.20%和 8.86%~26.50%。

在同一追氮时期下，伴随灌水量的增加，穗数、千粒重和籽粒产量均呈上升趋势，且均高于 CK 处理，增幅分别为 9.72%~13.19%、3.04%~4.23%和 9.41%~17.98%。上述结果表明，在拔节期灌水前增加 1 次小水量灌溉同步追氮对穗数、千粒重和籽粒产量有较好的促进作用，且增加灌

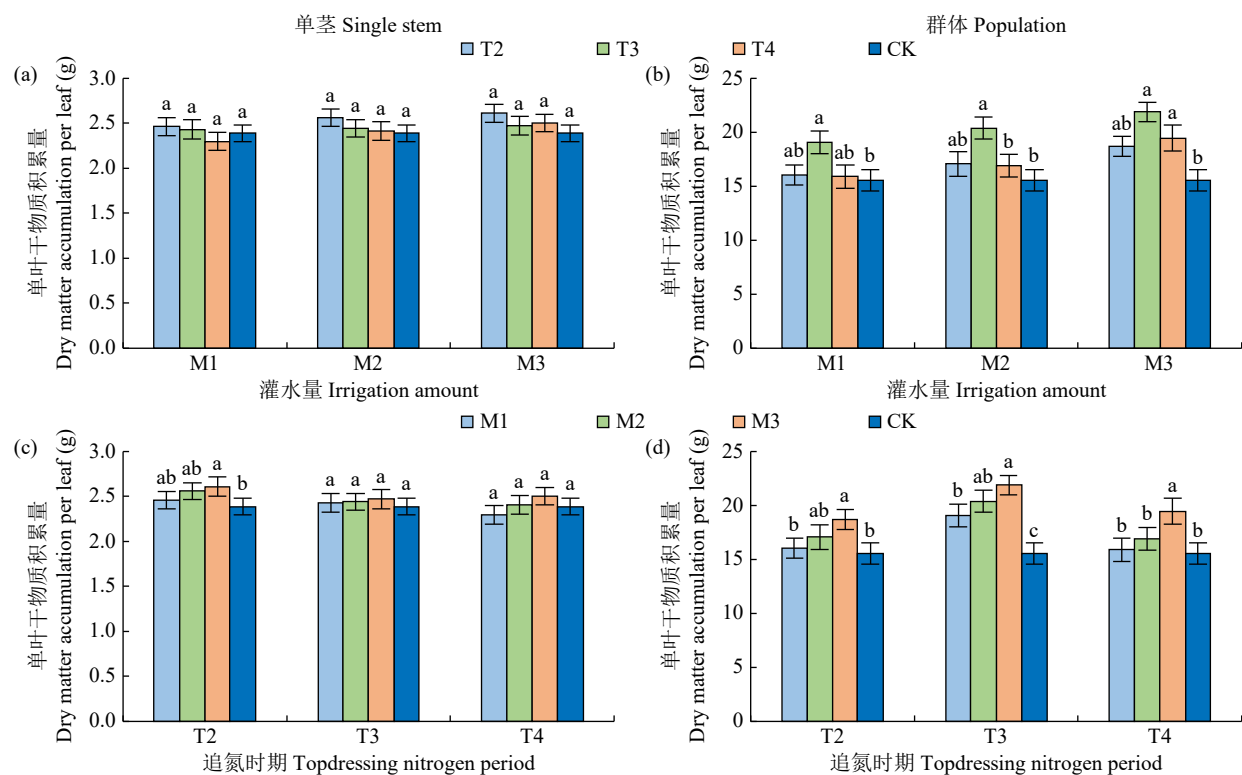


图 4 追氮时期和灌水量对小麦成熟期单叶干物质积累量的影响

Fig.4 Effects of topdressing nitrogen period and irrigation amount on dry matter accumulation at the wheat maturity

表 2 不同追氮时期和灌水量处理的
冬小麦籽粒产量及其构成因素

Table 2 Grain yield and its components of
winter wheat under different nitrogen topdressing
periods and irrigation amounts

处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm^2)
M1T2	651.70b	32.33a	41.59a	8764.23ab
M1T3	783.37a	32.27a	41.57a	9352.12a
M1T4	691.70ab	32.73a	41.10a	9305.37a
CK	651.70b	33.13a	39.76a	8584.45b
M2T2	666.70b	31.73a	43.07a	9111.57bc
M2T3	835.04a	31.83a	42.54a	10 064.66a
M2T4	701.70b	31.37a	41.79a	9197.40b
CK	651.70b	33.13a	39.76b	8584.45c
M3T2	715.04bc	30.93a	43.35a	9588.60b
M3T3	886.71a	32.63a	42.84a	11 033.30a
M3T4	778.37ab	32.47a	42.35a	10 703.36a
CK	651.70c	33.13a	39.76b	8584.45c
T	70.250***	0.016	1.234	19.250***
M	49.490***	0.085	14.452***	62.510***
T×M	8.420***	0.018	0.212	4.540**

“***” 和 “***” 分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平影响极显著。
“***” and “***” indicate extremely significant influences at $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively.

溉量能够强化这一促进效果。
进一步通过灌水追氮时期和灌水量及其交互

作用对小麦籽粒产量及其构成因素的方差分析可知，灌水追氮时期对小麦穗数和籽粒产量影响极显著；灌水量对穗数、千粒重和籽粒产量影响极显著；灌水追氮时期和灌水量的交互作用均极显著影响穗数和籽粒产量，说明水氮耦合最易通过调控穗数来影响籽粒产量。

2.7 小麦各农艺性状的相关性分析

由表 3 可知，千粒重及籽粒产量与旗叶和倒 2 叶的单叶干物质积累量均呈现显著正相关，而与倒 3 叶的相关性尚未达到显著水平；上 3 叶的叶面积与穗数、千粒重、籽粒产量的相关性较弱，仅倒 2 叶和倒 3 叶与千粒重呈现显著正相关；单茎干物质积累量与千粒重和籽粒产量均呈正相关，但与穗数呈负相关。此外，上 3 叶的 LAI 及群体干物质积累量与穗数、千粒重、籽粒产量均呈现显著正相关。单叶干物质积累量、叶面积、LAI 和干物质积累量与穗粒数均呈负相关。

3 讨论

3.1 追氮时期和灌水量对小麦叶片建成的影响

卜冬宁^[14]研究表明，将灌水追氮时期从旗叶露尖推迟至倒 3 叶露尖，旗叶面积逐渐减小，韩

表 3 叶面积、LAI 和干物质积累量与籽粒产量及其构成因素的相关性
Table 3 Correlation between leaf area, LAI, and dry matter accumulation with grain yield and its components

处理 Treatment	穗数 Spike number	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight	籽粒产量 Grain yield
倒 3 叶干物质积累量 Dry matter accumulation of L4	0.514**	-0.030	0.497**	0.674**
倒 2 叶干物质积累量 Dry matter accumulation of L5	0.345	-0.085	0.472**	0.495**
旗叶干物质积累量 Dry matter accumulation of L6	0.117	-0.102	0.072	0.308
倒 3 叶叶面积 Leaf area of L4	0.135	-0.009	0.274	0.230
倒 2 叶叶面积 Leaf area of L5	0.328	-0.017	0.436*	0.442*
旗叶叶面积 Leaf area of L6	0.057	-0.036	0.533**	0.113
倒 3 叶 LAI LAI of L4	0.742**	-0.058	0.445*	0.761**
倒 2 叶 LAI LAI of L5	0.763**	-0.008	0.507**	0.766**
旗叶 LAI LAI of L6	0.723**	-0.005	0.550**	0.687**
单茎干物质积累量 Single stem dry matter accumulation	-0.014	-0.061	0.382*	0.122
总干物质积累量 Total dry matter accumulation	0.864**	-0.160	0.446*	0.781**

“*” 和 “**” 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。
“*” and “**” indicate significant correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

东伟等^[15]研究也发现，冬小麦上 3 叶叶面积随灌水追氮时期的推迟呈逐渐降低趋势，与本研究结果相同。同时，Zhao 等^[16]也发现，将灌水追氮时期由返青期推迟至拔节期，冬小麦上 3 叶叶面积显著下降，说明推迟灌水追氮处理会导致冬小麦叶面积逐渐降低。另外，本研究还发现，随着春 1 水灌溉量的增加，孕穗期冬小麦上 3 叶的 LAI 呈上升趋势，与张笑培等^[17]和康子领等^[18]的研究结果相同。但是，张娜等^[19]研究发现，孕穗期冬小麦 LAI 随春 1 水灌溉量的增加呈先升高后降低的趋势，与本研究结果不同。可能是因为本研究是在灌溉拔节水之前增设了小水量灌溉，不同处理的灌溉量在 7.5~22.5 mm，而张娜等^[19]的研究中不同处理春 1 水的灌溉量在 99.0~135.0 mm，灌水量总体较高，说明适当增加春 1 水灌溉量可以提高小麦叶面积，但灌溉量过大其促进效果不再显著，因此可通过调节春 1 水的灌溉量灵活调控目标叶层 LAI。

3.2 追氮时期和灌水量对小麦成熟期干物质积累量的影响

本研究发现，成熟期冬小麦群体干物质积累量随灌水量的增加呈上升趋势，与李莉威^[20]和王欢等^[21]的研究结果相同。但是雷钧杰等^[10]研究发现，随着灌水量的增加冬小麦干物质积累量呈先升高后降低的趋势，可能是因为其研究中各处理生育期灌水量在 315.0~540.0 mm，而本试验各处理全生育期总灌水量仅在 127.5~142.5 mm，说明冬小

麦群体干物质积累量与灌水量的关系并非简单的线性正相关。此外，本研究还发现，灌水追氮时期从春 2 叶露尖推迟至旗叶露尖，成熟期干物质积累量呈先升高后降低的趋势，这与张迎香^[22]的研究结果基本一致。刘哲文等^[23]研究发现，将灌水追氮时期由拔节期推迟至挑旗期，成熟期冬小麦干物质积累量也呈降低趋势，说明灌水追氮时期对小麦干物质积累量的调控具有显著的阶段性特征，优化水氮管理应该匹配作物的阶段需求。

3.3 追氮时期和灌水量对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

本研究发现，将灌水追氮时期从春 2 叶露尖推迟至旗叶露尖，籽粒产量呈先升高后降低的趋势，这与郭平银等^[24]及康国章等^[25]的研究结果一致。但是熊豫来^[26]研究发现，灌水追氮时期从返青期推迟至拔节期，籽粒产量呈上升趋势，这是因为本试验年度返青至拔节期降水量为 0 mm，春 3 叶和旗叶露尖前土壤含水量仅为 12.15%和 11.55%，T3 灌溉后有效缓解了干旱胁迫，穗数显著增加，而 T4 灌溉较晚，穗数有所下降，从而导致产量下降。而熊豫来^[26]的研究中返青至拔节期降水量为 36.8 mm，晚灌溉未导致穗数显著下降，且提高了穗粒数和千粒重，所以产量升高。另外，本研究还发现，伴随拔节期灌水前补灌量的增加，穗数和籽粒产量均呈上升趋势，这与谢忠等^[27]和王子骞等^[28]的研究结果相同。但是，如先古力·阿吾提等^[29]的研究中，小麦穗数和籽粒产量均随灌水量

的增加呈先升后降的趋势,可能是因为本试验各处理拔节期灌水及在此之前的补灌水量总和仅在 67.5~82.5 mm,而如先古力·阿吾提等^[29]的试验中拔节期灌水量在 90.0~180.0 mm,说明返青至拔节阶段灌水并非越多越好。

本研究中,在拔节期灌水前补充小水量灌溉的所有处理穗数、千粒重及籽粒产量均高于仅在拔节期灌溉水的 CK 处理。周吉红等^[30]研究也发现,将拔节期一次性灌溉 75 mm 改为返青期灌水 30 mm 和拔节期灌水 45 mm,穗数和千粒重均显著提高,说明在灌溉拔节水前增加小水量灌溉,有利于增产。本试验年度返青至拔节阶段降水量为 0 mm,期间耕层土壤含水量最低至 10.23%,属于春季严重干旱的年份,这可能是在灌溉拔节水前增加小水量灌溉显著增产的原因之一,在其他降水年份下效果如何有待进一步研究。

4 结论

在灌溉拔节水前增加小水量灌溉并同步追氮对小麦的叶片干物质积累量和籽粒产量有促进作用,且作用大小与补充灌溉的时期和数量密切相关。春 2 叶露尖时补充灌溉并追氮对上 3 叶叶面积促进作用最大,但春 3 叶露尖时补充灌溉并追氮对穗数、LAI、群体干物质积累量和籽粒产量的促进作用最大。在 3 个补灌时期条件下,将灌水量由 7.5 mm 逐步增加至 22.5 mm,对穗数、LAI、干物质积累量、千粒重和籽粒产量均有正向促进作用。

参考文献

- [1] 张新仕,李敏,王亚楠,等.河北省小麦产业发展现状及对策.农业展望,2023,19(5):51-56.
- [2] 张一帆.基于多源数据的黄淮海小麦生产量化分析.郑州:河南农业大学,2023.
- [3] 杨林林,高阳,申孝军,等.播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响.灌溉排水学报,2015,34(9):1-6.
- [4] 何进尚,张维军,王小亮,等.返青期水氮耦合对宁夏灌区早熟冬小麦物质积累、氮素运移及产量的影响.江苏农业科学,2023,51(12):72-77.
- [5] 杨永安,马志琪,侯海鹏,等.节水灌溉对小麦产量及水肥利用效率的影响试验研究.天津农林科技,2021(1):15-17.
- [6] 何璐.不同叶龄期灌水追氮对冬小麦器官建成和群体结构及产量的影响.保定:河北农业大学,2022.
- [7] 李晓爽,党红凯,宋妮,等.分期定量春灌一水对麦田蒸散量与产量构成的影响.农业机械学报,2019,50(9):280-289.
- [8] 孙明清,江彦军,张辉,等.春灌 1 水条件下灌溉时间对冬小麦产量及产量构成的影响.河北农业科学,2019,23(6):27-30.
- [9] 海峰.不同滴灌量对冬小麦产量形成及品质的影响.阿拉尔:塔里木大学,2024.
- [10] 雷钧杰,张永强,张宏芝,等.不同滴灌量对冬小麦干物质积累、转运及产量的影响.新疆农业科学,2016,53(4):596-603.
- [11] 赛力汗·赛,薛丽华,张永强,等.滴灌量对冬小麦干物质积累、灌浆和籽粒产量的影响及行间差异.麦类作物学报,2018,38(3):323-329.
- [12] 赛力汗·赛,张永强,薛丽华,等.新疆滴灌冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响.中国农业大学学报,2018,23(8):30-40.
- [13] Cao Y X, Cai H J, Sun S K, et al. Effects of drip irrigation methods on yield and water productivity of maize in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 127227.
- [14] 卜冬宁.氮肥基追比和追肥时期对超高产冬小麦生长发育及产量形成的影响.保定:河北农业大学,2012.
- [15] 韩东伟,何建宁,李浩然,等.灌水时期对冬小麦个体、群体结构和冠层光合作用的影响.江苏农业学报,2022,38(3):577-586.
- [16] Zhao H X, Zhang P, Wang Y Y, et al. Canopy morphological changes and water use efficiency in winter wheat under different irrigation treatments. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(4): 1105-1116.
- [17] 张笑培,周新国,王和洲,等.拔节期水氮处理对冬小麦植株生长及氮肥吸收利用的影响.灌溉排水学报,2021,40(10):64-70.
- [18] 康子领,张向前,刘利平.灌水量和喷抗旱剂对小麦生长发育、光合及水分利用率的影响.安徽农业科学,2022,50(15):25-28,38.
- [19] 张娜,张永强,李大平,等.滴灌量对冬小麦光合特性及干物质积累过程的影响.麦类作物学报,2014,34(6):795-801.
- [20] 李莉威.不同滴灌量和追氮时期对小麦产量及水氮利用效率的影响.保定:河北农业大学,2024.
- [21] 王欢,苏文平,赵鑫琳,等.不同水氮处理对冬播春小麦产量和水氮利用效率的影响.麦类作物学报,2022,42(11):1381-1390.
- [22] 张迎香.春季水氮施用时期对不同种植密度冬小麦群体结构和产量的影响.保定:河北农业大学,2023.
- [23] 刘哲文,郭丹丹,常旭虹,等.追氮对弱筋小麦干物质、氮素积累及产量的影响.麦类作物学报,2023,43(8):1029-1038.
- [24] 郭平银,李士平,祁士军.追氮时期对不同类型小麦籽粒产量和品质影响.德州学院学报,2007,23(4):43-48.
- [25] 康国章,郭天财,朱云集,等.不同生育时期追氮对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响.河南农业大学学报,2000,34(2):103-106.
- [26] 熊豫来.滴灌追肥时间对不同播期冬小麦群体发展和产量的影响.太谷:山西农业大学,2024.
- [27] 谢忠,叶含春,王振华,等.浅埋滴灌水氮配施对冬小麦生长发育、产量及水分利用效率的影响.新疆农业科学,2024,61(5):1057-1066.
- [28] 王子骞,贾永红,石书兵,等.调亏灌溉对新疆滴灌冬小麦产量及水分利用效率的影响.江苏农业科学,2024,52(24):79-86.
- [29] 如先古力·阿吾提,马英杰,周会军,等.不同灌水量对叶尔羌河灌区滴灌冬小麦产量及水分利用率的影响.新疆农业大学学报,2018,41(4):287-291.
- [30] 周吉红,毛思帅,孟范玉,等.春季灌水和追氮对北京冬小麦生长发育和产量的影响.麦类作物学报,2021,41(12):1548-1555.

Effects of Supplemental Irrigation and Nitrogen Topdressing before Jointing on Leaf Dry Matter Accumulation and Yield of Wheat

Zhao Yongman, Li Ruiqi, Wang Hongguang

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University / State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation / Hebei Provincial Laboratory of Crop Growth Regulation, Baoding 071001, Hebei, China)

Abstract To investigate the effects of small-volume irrigation and nitrogen topdressing before the jointing stage on leaf dry matter accumulation and yield of wheat, a field experiment was conducted during the 2024-2025 wheat growing season using Jimai 22 as the test material. Three irrigation treatments were set: the emergence of the 2nd (T2), 3rd (T3), and 4th (T4) spring leaf tips. Under each treatment, three irrigation amounts were applied: 7.5 (M1), 15.0 (M2), and 22.5 mm (M3), and conventional irrigation treatment was used as the control (CK). Each treatment received 60 mm of irrigation at the jointing and flowering stages, respectively. The study analyzed the effects of different water and nitrogen management strategies on leaf area, leaf area index (LAI), relative chlorophyll content (SPAD value), dry matter accumulation, and grain yield of wheat. Results showed that under the same supplemental irrigation amount, with the delay of the growth stage, the area of the top three leaves significantly decreased, while the LAI and dry matter accumulation showed a trend of first increasing and then decreasing. The SPAD values of the top three leaves after flowering showed no significant change, and the spike number and grain yield also showed a trend of first increasing and then decreasing, but they were all higher than those of the CK treatment. Under the same supplemental irrigation period, leaf area, LAI, dry matter accumulation, spike number, 1000-grain weight, and grain yield all increased with the increase in irrigation amount and were higher than those of the CK treatment; the grain yield of the M3 treatment increased by 28.54% compared with CK, and there were no significant differences in SPAD values among different irrigation amount treatments. The timing and amount of irrigation and nitrogen topdressing exhibited a significant interaction effect on the spike number and grain yield. In conclusion, based on irrigation at the jointing stage, applying 22.5 mm of irrigation and nitrogen topdressing at the spring 3rd leaf tip emergence stage can effectively increase spike number and LAI, achieving an increase in wheat yield.

Key words Wheat; Irrigation timing; Irrigation amount; Leaf dry matter accumulation; Grain yield