

分层施氮对冬小麦干物质积累与分配及产量的影响

冯浩伟,吕新华,王胜楠,张永巧,丁宁,王文宣,姜文焕,林祥,王东

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

摘要:为探究分层施氮对冬小麦干物质积累与分配及籽粒产量的影响,选用冬小麦品种伟隆 169 为试验材料,以控释尿素(含氮量 44%,控释期 3 个月)作氮肥,氮磷钾肥均于播种期一次施用,设置两种施氮方式(单层条施:施肥深度 8 cm;分层条施:按 1:2:1 的比例分别条施于 8、16、24 cm 土层)和三个施氮水平(常规施氮:240 kg·hm⁻²;减氮 20%:192 kg·hm⁻²;减氮 40%:144 kg·hm⁻²),比较分析了不同处理下冬小麦群体和干物质变化动态、开花后干物质同化和再分配、籽粒产量及其构成因素的差异。结果表明,相同施氮方式下,冬小麦成熟期干物质积累量和籽粒产量随施氮量的增大而显著增加;在施氮 192 和 240 kg·hm⁻² 条件下,与单层施氮相比,分层施氮对拔节前单位面积茎数和干物质积累量无显著影响,但显著提高成穗率和拔节至成熟期干物质积累量,其中成穗率增幅为 2.2~2.5 个百分点;分层施氮后成熟期干物质积累量和籽粒产量分别提高 11.1%~12.3%和 10.0%~12.0%;分层施氮 192 kg·hm⁻² 处理的成熟期穗数、干物质积累量和籽粒产量与单层施氮 240 kg·hm⁻² 处理无显著差异。这说明分层施氮条件下即使减量 20%施氮也能获得与单层常规施氮量处理相当的籽粒产量,继续增加施氮量至 240 kg·hm⁻² 时,冬小麦籽粒产量进一步显著提高。

关键词:冬小麦;分层施肥;氮肥减量;干物质积累与分配;籽粒产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)07-0952-09

Effects of Layered Nitrogen Application on Accumulation and Distribution of Dry Matter, and Yield of Winter Wheat

FENG Haowei, LÜ Xinhua, WANG Shengnan, ZHANG Yongqiao, DING Ning,
WANG Wenxuan, JIANG Wenhuan, LIN Xiang, WANG Dong

(College of Agronomy, Northwest A&F University/State Key Laboratory for Crop Stress
Resistance and High-Efficiency Production, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the effects of layered nitrogen application on accumulation and distribution of dry matter, and yield of winter wheat, Weilong 169 was selected as the experimental variety, and controlled-release urea (nitrogen content 44%, controlled-release period of 3 months) was selected to fertilize at one time at the sowing stage. Two nitrogen application methods (N8: 8 cm basal fertilizer single-layer strip application; N121: basal fertilizer was applied to 8, 16, and 24 cm soil layers at a ratio of 1:2:1) were conducted with three nitrogen application rates (conventional nitrogen application: 240 kg·hm⁻²; nitrogen reduction 20%: 192 kg·hm⁻²; nitrogen reduction 40%: 144 kg·hm⁻²). The dynamics of winter wheat population and dry matter change, dry matter assimilation and redistribution after flowering, grain yield and its components were studied. The results showed that under the same fertilization method, the dry matter accumulation and grain yield of winter wheat at maturity increased significantly with the increase of nitrogen application rate. When the nitrogen ap-

收稿日期:2025-02-12 修回日期:2025-03-28

基金项目:旱区农业陕西实验室开放项目(2024ZY-JCYJ-02-30);国家重点研发计划项目(2024YFD2300205);陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-01)

第一作者 E-mail:19860912901@163.com(冯浩伟)

通讯作者 E-mail:wangd@nwafu.edu.cn(王东)

plication rate was 192—240 kg · hm⁻², there was no significant difference in the number of stems and dry matter accumulation per unit area before jointing in winter wheat compared with single-layer nitrogen application treatment, the dry matter accumulation and panicle rate after jointing were significantly increased, among which the panicle rate increased by 2.2—2.5 percentage points, the dry matter accumulation at maturity increased by 11.1%—12.3%, and the grain yield increased by 10.0%—12.0%. At the same time, there was no significant difference in panicle number, dry matter accumulation and grain yield at maturity in N121 20% nitrogen reduction treatment compared with N8 conventional nitrogen application treatment. The results showed that even if the nitrogen application rate was reduced by 20%, the grain yield of the conventional nitrogen application rate of N8 treatment could be obtained, and the grain yield of winter wheat could be significantly increased by increasing the nitrogen application rate to 240 kg · hm⁻², and the yield of winter wheat could be significantly increased compared with the N8 conventional nitrogen application rate.

Keywords: Winter wheat; Layered fertilization; Nitrogen fertilizer reduction; Matter accumulation and distribution; Grain yield

小麦是中国第三大粮食作物,在保障国家粮食安全中具有极其重要的地位^[1]。据统计,2023年中国小麦种植面积2 363万hm²,总产量13 659万t。小麦产量的提高主要得益于氮肥的投入^[2]。氮是小麦生长发育过程中不可或缺的营养元素,合理的氮肥施用能够提高小麦产量^[3]。然而实际生产中,施肥粗放的问题却普遍存在^[4]。不合理的氮肥投入不仅难以提高小麦单产,往往还会造成资源浪费及环境污染^[5-6]。近40年来,中国氮肥施用量增长3倍,年氮素盈余约1 130万t^[7]。氮肥过量施用会增进农田NH₃挥发、N₂O排放和深层土壤中硝态氮的积累,引起土壤酸化和水体富营养化,加剧全球气候变暖,影响正常的农业生产^[8-10]。科学施肥是提高氮素利用效率、平衡环境保护与作物生产力之间矛盾的重要途径^[11]。前人研究认为,适当减少氮肥施用量可以获得更高的小麦产量,提高氮肥利用效率,增加经济效益,减少环境污染,但过量或不科学的减氮措施往往会导致产量降低^[12]。传统的氮肥浅施往往伴随着大量的气态氮损失,使得肥料中养分被利用量降低,影响小麦产量和肥料利用率^[13-14]。相比传统施肥方式,深层施肥虽能减少农田气态氮损失,却增加了氮素的淋溶风险,同时还会使浅层养分低的土壤出现苗弱现象^[15-16]。而分层施肥作为一种更加科学有效的施肥技术,能够在减少氮素气态损失的同时,降低土壤氮素淋溶风险,缓解土壤养分在时间和空间上的错位,促进作物在不同生育时期对土壤养分和水分的吸收,增加作物产量、减轻环境压力^[17]。试验结果显示,

在0~24 cm土层内采用分层施肥方式(8 cm:16 cm:24 cm=1:2:1)相比传统8 cm单层施肥,能够显著减少氮素损失,提高冬小麦产量^[18]。土柱栽培试验结果显示,肥料分层施用可促进小麦根系生长,增加旗叶面积,改善光合^[19]。Liu等^[18]综合考虑氮素损失对生态系统、人类健康和全球气候变暖的隐性成本,认为分层施肥通过优化不同土层氮素分配比例,可有效降低环境成本,增加产量收益。同时有研究表明,基肥深施减氮15%可显著增加冬小麦收获指数,实现减氮不减产^[20]。但有关分层施肥条件下减量施氮对冬小麦生长的影响鲜有报道。本试验在常规施氮量基础上设置氮肥减量处理,探究分层施氮对冬小麦干物质积累与分配及籽粒产量的影响,以期对冬小麦“减氮增效”提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023—2024年在西北农林科技大学曹新庄试验农场(34°17'N,108°8'E)进行。该地区属暖温带半湿润季风气候区,平均海拔455 m,年均无霜期210 d,年累计日照时数2 164 h,年平均气温13℃,年平均降水量635 mm,其中冬小麦生长季平均气温10℃,平均降水量219 mm。试验地土壤类型为壤土,前茬种植玉米,水肥统一管理,玉米收获后秸秆粉碎还田。播种前0~24 cm土层养分含量见表1,试验期间降水量和日均气温见图1。

表 1 冬小麦播前 0~24 cm 土层养分含量

Table 1 Nutrient content of 0~24 cm soil layers before sowing of winter wheat

土层 Soil layer/cm	全氮 Total N/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g · kg ⁻¹)
0~8	1.3	92.3	28.4	230.8	36.0
8~16	1.2	106.8	13.3	149.5	32.2
16~24	0.9	81.0	3.6	141.0	20.0

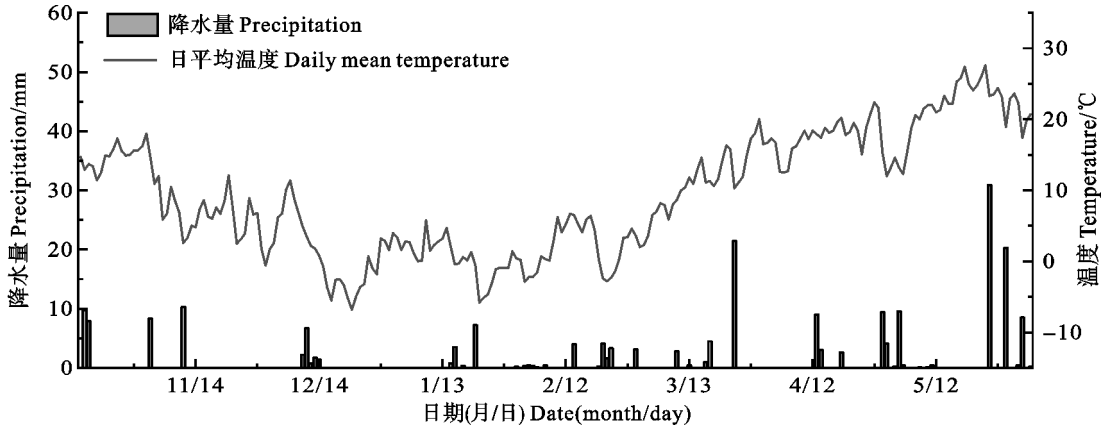


图 1 冬小麦全生育期日平均气温及降水量

Fig. 1 Precipitation and average daily temperature throughout the whole growth period of winter wheat

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为伟隆 169, 2023 年 10 月 17 日播种, 基本苗 450 万株 · hm⁻², 行距 20 cm。试验采用裂区设计, 主区设置两种施氮方式: N8 (8 cm 单层条施) 和 N121 (按 1:2:1 的比例分别条施于 8、16、24 cm 土层); 副区设置三个施氮水平: 常规施氮量 (240 kg · hm⁻²), 减氮 20%, (192 kg · hm⁻²), 减氮 40% (144 kg · hm⁻²), 各处理重复 3 次, 小区面积 50 m² (20.0 m × 2.5 m)。试验采用双旋耕按比例分层施肥宽幅精量播种机 (ZL201521098389.4)^[21] 进行施氮与播种。氮肥选用控释尿素 (含氮量 44%, 控释期 3 个月), 于播种时一次性施用; 磷肥和钾肥分别选用重过磷酸钙和氯化钾, 施用量分别为 P₂O₅ 120 kg · hm⁻² 和 K₂O 120 kg · hm⁻², 均于播种前撒施后用旋耕机旋入土壤。其他管理措施同一般高产田, 2024 年 6 月 4 日收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 茎蘖动态调查

定点选取 1 m × 0.4 m 的样方调查小麦越冬前期、返青期、拔节期、开花期的总茎数和成熟期有效穗数, 重复 3 次。用成熟期有效穗数除以分蘖高峰期总茎数计算成穗率。

1.3.2 干物质积累与分配测定

冬小麦关键生育时期在每个小区采集 0.25 m × 0.4 m 的所有小麦植株地上部, 其中开花期按叶片、茎秆 + 叶鞘、穗分样, 成熟期按叶片、茎秆 + 叶鞘、颖壳 + 穗轴、籽粒分样, 将植株样品 105 °C 杀青后, 70 °C 烘干至恒重, 称重。同时参考下列公式计算冬小麦干物质积累与转运参数^[22]: DMR = DM_{ant} - DM_{mat}; DMRE = DMR / DM_{ant} × 100%; DMRCG = DMR / GW × 100%; DMAA = GW - DMR; DMAACG = DMAA / GW × 100%。上述公式中, DMR 表示花前干物质转运量; DM_{ant} 表示开花期地上部干重; DM_{mat} 表示成熟期地上部营养器官干重; DMRE 表示花前干物质转运效率; DMRCG 表示花前干物质对籽粒产量的贡献率; GW 表示成熟期籽粒干重; DMAA 表示花后干物质积累量; DMAACG 表示花后干物质对籽粒产量的贡献率。

1.3.3 籽粒产量及构成因素测定

成熟期收获具有代表性的 3 m² 小麦, 风干测定籽粒含水量, 称重并计算产量; 调查成熟期穗数、穗粒数和千粒重。计算氮肥偏生产力 (PFP_N = Y / F), PFP_N 表示氮肥偏生产力, Y 表示成熟期籽粒产量, F 表示施氮量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理。采用 SPSS 26.0 进行统计分析。用最显著差异法(LSD, $\alpha = 0.05$) 检验不同处理间的差异显著性。采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果分析

2.1 不同施氮处理对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

相同施氮方式下,随施氮量的增加,冬小麦籽粒产量、穗数和穗粒数均呈上升趋势,而千粒重呈下降趋势,不同施氮量间各指标差异均显著;氮肥偏生产力呈下降趋势(表 2)。施氮量为 192 和 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,分层施氮(N121)的籽粒产量和氮肥偏生产力均显著高于单层施氮(N8),产量增幅为 10.0%~12.0%,氮肥偏生产力增幅为 10.1%和 11.8%。在施氮 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,N121 的成熟期穗数、穗粒数较 N8 均显著提高,增幅分别为 6.4%和 3.9%;在施氮 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下 N121 的穗粒数较 N8 显著提高,增幅 7.7%;在施氮 144 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下 N121 的产量及其构成因素和氮肥偏生产力与 N8 差异均不显著。与单层施氮 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理相比,分层施氮 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的穗数、穗粒数和籽粒产量均无显著差异,氮肥偏生产力显著提高(增幅 23.4%)。这说明冬小麦分层减量 20%施氮也能获得与单层常规施氮处理相当的籽粒产量;施氮量增加至 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,分层施氮可进一步增加穗数和穗粒数,最终提高籽粒产量。

2.2 不同施氮处理对冬小麦群体茎蘖动态变化的影响

在施氮 192 和 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,与 N8 相比,N121 的返青期单位面积茎数减少,但开花期和成熟期单位面积茎数和成穗率(增幅 2.2~2.5 个百分点)显著提高(表 3)。与单层施氮 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理相比,分层施氮 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的返青期和拔节期单位面积茎数显著降低,但开花期至成熟期单位面积茎数无显著差异,成穗率提高了 1.8 个百分点。这说明施氮 192~240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下,分层施氮能够减少冬小麦拔节前无效分蘖的发生,优化群体结构,促进分蘖成穗,增加穗数;与单层施氮 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比,分层施氮 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 虽然减少了冬小麦返青期至拔节期的分蘖数,但通过提高成穗率仍然获得较高的穗数。

2.3 不同处理对冬小麦干物质积累动态的影响

相同施氮方式下,随着施氮量的增加,冬小麦返青至成熟期的干物质积累量均呈上升趋势,不同施氮量间差异均显著(图 2)。施氮 192 和 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,N121 的开花期至成熟期的干物质积累量显著高于 N8,其中开花期和成熟期干物质积累量增幅分别为 7.3%~9.3%和 11.1%~12.3%。与单层施氮 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理相比,分层施氮 192 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的拔节期干物质积累量显著降低,但开花期至成熟期干物质积累量无显著差异。这说明施氮量为 192~240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,单层施氮能够显著促进冬小麦开花后干物质积累;分层减量 20%施氮在拔节后也能获得与单层常规施氮相当的干物质积累量。

表 2 不同处理下冬小麦产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of winter wheat under different treatments

施氮方式 N application mode	施氮量 N level/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗数 Spikes/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-Grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥偏生产力 PPFN/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
N8	240	579.6b	40.9b	40.8c	8 702.7b	36.3c
	192	538.7c	37.5c	42.4b	7 810.5c	40.7b
	144	471.2d	32.9d	43.4a	6 247.7d	43.4a
N121	240	616.7a	42.5a	40.2c	9 750.2a	40.6b
	192	564.0bc	40.4b	42.1b	8 593.2b	44.8a
	144	500.4d	33.6d	43.3a	6 601.9d	45.8a

同列数值后不同字母表示不同处理间差异显著。下表同。

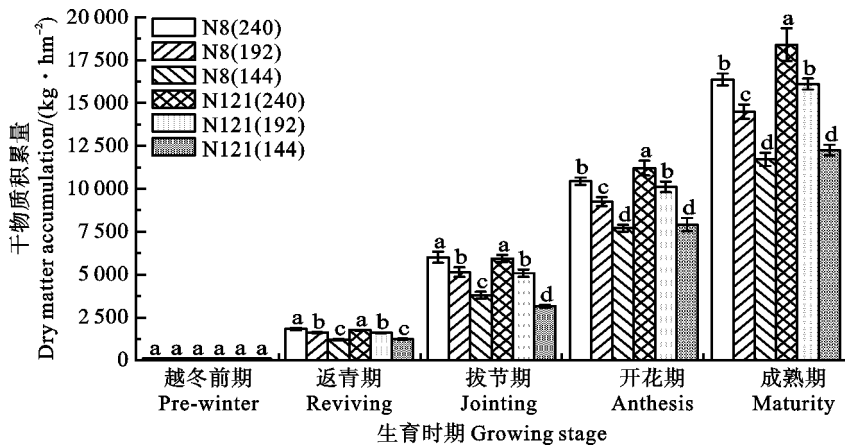
Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

The same in tables 3 and 4.

表 3 不同处理下各生育时期冬小麦单位面积茎数变化

Table 3 Changes of stem numbers per unit area at different growth stages of winter wheat under different treatments

施氮方式 N application mode	施氮量 N level/ (kg · hm ⁻²)	单位面积茎数 Stem number per unit area/(×10 ⁴ stems · hm ⁻²)					成穗率 Earing rate/%
		越冬前期 Pre-winter	返青期 Reviving	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	
N8	240	1 163.7a	2 547.2a	2 113.5a	586.5b	579.6b	22.8b
	192	1 157.1a	2 438.4a	1 949.6b	542.4c	538.7c	22.1b
	144	1 156.4a	2 153.6c	1 821.9cd	476.3d	471.2c	21.9b
N121	240	1 172.1a	2 465.1a	2 088.8a	620.4a	616.7a	25.0a
	192	1 159.1a	2 291.2b	1 892.2bc	568.1bc	564.0bc	24.6a
	144	1 138.6a	2 160.0c	1 778.1d	505.1d	500.4c	23.2b



同一时期图柱上不同字母表示不同处理间差异显著。N8(240)、N8(192)和 N8(144) 分别指单层施氮 240、192 和 144 kg · hm⁻²。N121(240)、N121(192)和 N121(144) 分别指分层施氮 240、192 和 144 kg · hm⁻²。下图同。

Different letters above the columns at the same stages indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. N8 (240), N8(192) and N8(144) refer to the three nitrogen levels of 240, 192 and 144 kg · hm⁻² under single-layer application, respectively. N121(240), N121(192) and N121(144) refer to the three nitrogen levels of 240, 192 and 144 kg · hm⁻² under multi-layer application, respectively. The same in figure 3.

图 2 不同处理下各生育时期冬小麦干物质积累量

Fig. 2 Dry matter accumulation of winter wheat at different growth stages under different treatments

2.4 不同施氮处理对冬小麦成熟期干物质在各器官分配的影响

施氮量为 192 和 240 kg · hm⁻² 时,与 N8 相比,N121 对冬小麦成熟期干物质在各器官的分配比例无显著影响,但显著提高了茎秆+叶鞘、叶片、籽粒中的干物质积累量(图 3)。与单层施氮 240 kg · hm⁻² 处理相比,分层施氮 192 kg · hm⁻² 处理的各器官成熟期干物质积累量及分配比例无显著差异。这说明施氮 192~240 kg · hm⁻² 时,分层施氮可促进成熟期各器官干物质的积累,但对干物质在各器官中的分配比例无显著影响;分层减量 20%施氮仍可以保持与单层常规施氮相当的成熟期各器官干物质积累量。

2.5 不同处理对冬小麦开花后干物质同化和再分配的影响

施氮量为 192 和 240 kg · hm⁻² 时,与 N8 相比,N121 对花前干物质转运量无显著影响,但显著提高花后干物质积累量,增幅 14.3%和 21.1%(表 4)。在施氮 240 kg · hm⁻² 时,N121 的花前干物质转运效率较 N8 降低了 3.6 个百分点,但其花后干物质对籽粒产量的贡献率提高了 5.4 个百分点。与单层施氮 240 kg · hm⁻² 处理相比,分层施氮 192 kg · hm⁻² 处理的花后干物质积累量无显著差异。这说明施氮量为 192~240 kg · hm⁻² 条件下,分层施氮可促进冬小麦花后干物质积累,提高其对籽粒产量的贡献量;分层减量 20%施氮也能保持与单层常规施氮相当的花前干物质转运量和花后干物质积累量。

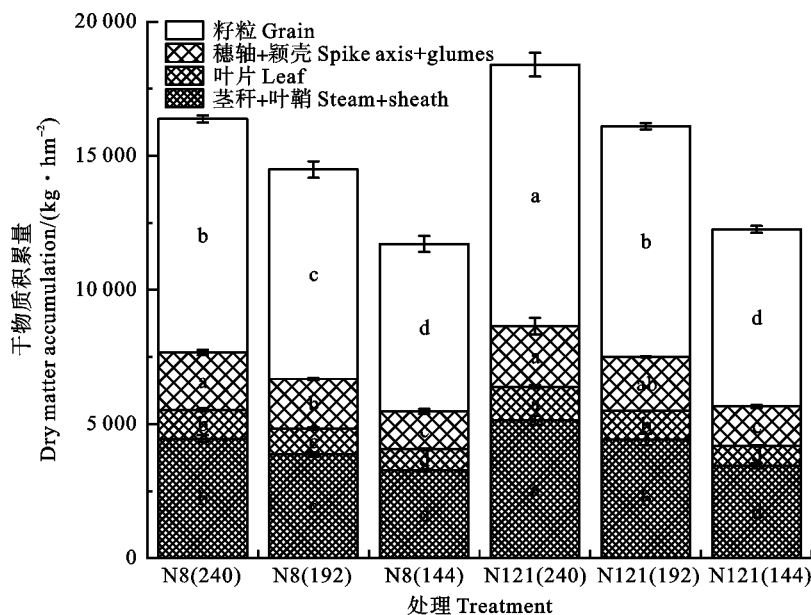


图 3 不同处理下冬小麦成熟期干物质在各器官的分配

Fig. 3 Dry matter distribution in various organs at maturity stage of winter wheat under different treatments

表 4 不同处理下冬小麦花前贮存干物质及花后同化干物质向籽粒的再分配

Table 4 Translocation to grain from dry matter accumulated before anthesis and assimilation after anthesis in winter wheat under different treatments

施氮方式 N application mode	施氮量 N level/ (kg · hm ⁻²)	贮存干物质 DMABA			同化干物质 DMPAAA	
		转运量 DMR/(kg · hm ⁻²)	转运效率 DMRE/%	贡献率 DMRCG/%	积累量 DMAA/(kg · hm ⁻²)	贡献率 DMAACG/%
N8	240	2 769.5a	26.5bc	31.8bc	5 933.2b	68.2bc
	192	2 572.5a	27.8abc	33.0abc	5 238.1c	67.0bcd
	144	2 234.6b	29.0a	35.8a	4 013.1d	64.2d
N121	240	2 563.1a	22.9d	26.4d	7 187.1a	73.6a
	192	2 603.7a	25.7c	30.3c	5 989.5b	69.7b
	144	2 256.3b	28.5ab	34.2ab	4 345.5d	65.8cd

3 讨论

3.1 分层施氮对冬小麦产量及其构成因素的影响

氮肥减量与肥料深施相结合是实现氮肥减量增效的重要途径^[23]。有研究表明,氮肥深施减量 15% 处理的冬小麦籽粒产量与常规施氮处理持平^[24]。而分层施肥作为一种更加科学有效的肥料施用技术,通过优化肥料在不同土层中的分布,可以更好地满足作物不同生育时期对于养分的需求,增强作物捕获土壤养分的能力^[17,25]。本研究中,分层施氮即使减少 20% 的施氮量也能获得与单层常规施氮量处理相当的籽粒产量。这可能与氮肥减量深施降低了农田氮素的气态损失有关^[26]。适当增加施氮量是作物增产的重要措施^[27]。但在传统肥料浅施方式下,施氮量超过

240 kg · hm⁻² 后,作物产量会呈现下降趋势,需要通过优化施肥方案才能继续提高单产^[28-29]。本研究表明,分层施氮 192 kg · hm⁻² 的籽粒产量与单层施氮 240 kg · hm⁻² 相当,继续增加施氮量至 240 kg · hm⁻² 时,分层施氮可进一步提高小麦籽粒产量,其产量相较于单层施氮 240 kg · hm⁻² 大幅度增加。冬小麦籽粒产量的高低取决于成熟期穗数、穗粒数、千粒重的协同提升^[30]。单纯增加施氮量很难实现产量构成因素的同步提高^[9]。大量研究表明,随着氮肥施用量的增加,冬小麦穗数和穗粒数逐渐增加,但其千粒重却呈现下降趋势^[31-32]。本研究发现,在单层施氮条件下,随着施氮量的增加,冬小麦产量构成因素之间也存在类似的变化趋势。但闫恒辉等^[9]研究认为,在相同施肥量下,将单层施肥改为分层施肥后,小

麦产量构成因素间可以有效协调,在保持较高穗粒数和千粒重的同时,穗数增加。本研究发现,施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,与单层施氮处理相比,分层施氮处理可以在保持千粒重不变的情况下,显著增加冬小麦穗数和穗粒数,说明通过优化施氮方式,改单层施氮为分层施氮,可以提高氮肥偏生产力,这是持续提高冬小麦单产的重要措施。

3.2 分层施氮对冬小麦群体及干物质变化动态的影响

合理的氮素供应在优化冬小麦分蘖动态中起着重要作用^[33-35]。温樱等^[36]研究表明,底肥按比例分层条施能够有效促进冬小麦分蘖发生,增加成穗数。这与本试验研究结果一致。此外,施氮量为 $192 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,分层施氮主要通过“前控后促”的机制,减少冬小麦返青期至拔节期无效分蘖的发生,优化群体结构,提高其成穗数。这可能是由于减少浅层氮肥的施用量有效抑制了分蘖盛期无效分蘖的发生,并且随着生育进程的发展,深层氮素的释放更好地满足了作物生长的需求^[17]。冬小麦干物质积累与群体生长动态具有一致性^[37]。前人^[36]研究认为,底肥分层条施对冬小麦干物质积累的影响主要表现在返青期以后。本研究进一步证明,施氮量为 $192 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,分层施氮既能在拔节前维持较高的干物质积累量,又能显著提高拔节后的干物质积累量;同时,分层施氮通过促进开花后干物质积累来促进冬小麦增产。这可能与优化氮肥施用延缓冬小麦旗叶衰老,增加旗叶干物质生产力有关^[38]。

4 结论

施氮量为 $192 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,与单层施氮相比,分层施氮能够减少冬小麦拔节前无效分蘖的发生,优化群体结构,显著提高成穗率和成熟期干物质积累量。减量 20% 施氮也能获得与单层常规施氮相当的籽粒产量,继续增加施氮量至 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时分层施氮相较于单层常规施氮可实现产量和氮肥偏生产力协同提高。综合考虑本研究区域提升单产需要,推荐施氮量采用 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥在播种期按 1:2:1 的比例分别施入 8、16、24 cm 土层深处。

参考文献:

- [1]牛聪聪,张羽丰,王萍,等. 优化施氮对小麦产量及氮肥利用的影响综述[J]. 农业与技术,2023,43(13):23.
NIU C C,ZHANG Y F,WANG P,*et al.* Review on the influence of optimized nitrogen application on wheat yield and nitrogen utilization [J]. *Agriculture and Technology*,2023,43(13):23.
- [2]张文霞,李盼,殷文,等. 麦后复种绿肥及配施不同水平氮肥对小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(17):3317.
ZHANG W X,LI P,YIN W,*et al.* Effects of multiple green manure after wheat combined with different levels of nitrogen fertilization on wheat yield,grain quality,and nitrogen utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2023,56(17):3317.
- [3]张曼,周苏玫,杨习文,等. 减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(20):3885.
ZHANG M,ZHOU S M,YANG X W,*et al.* Effects of nitrogen-reducing and suitable soil moisture on nitrate nitrogen distribution in soil,nitrogen absorption and utilization of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2017,50(20):3885.
- [4]肖建军,崔荣宗,魏建林,等. 山东省粮食主产区农户施肥行为调查分析:以德州市平原县为例[J]. 山东农业科学,2014,46(12):84.
XIAO J J,CUI R Z,WEI J L,*et al.* Investigation and analysis of farmers' fertilization behavior in major grain producing area of Shandong Province: A case study in Pingyuan County of Dezhou [J]. *Shandong Agricultural Sciences*,2014,46(12):84.
- [5]温樱,王东. 底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(5):1387.
WEN Y,WANG D. Basal fertilization in strips at different soil depths to increase dry matter accumulation and yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2017,23(5):1387.
- [6]孔丽婷,蒋桂英,杨灵威. 减量施氮对滴灌春小麦干物质和氮素积累转运特征的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(3):317.
KONG L T,JIANG G Y,YANG L W. Effect of reduced nitrogen application on dry matter and nitrogen accumulation and transportation characteristics of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2021,41(3):317.
- [7]ZHANG X Y,WANG Z H,WANG Y C,*et al.* Contribution of nitrogen to main cereal crops yield and the key drivers in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*,2025,212:107995.
- [8]刘东军,张宏纪,孙岩,等. 氮肥对小麦氮积累和分配及氮肥利用率影响的研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2017(11):93.
LIU D J,ZHANG H J,SUN Y,*et al.* Research progress of effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation and distribution and nitrogen use efficiency in wheat [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*,2017(11):93.
- [9]闫恒辉,温樱,王东. 底肥分层条施对冬小麦旗叶衰老和光合特性、籽粒产量和肥料利用率的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(5):813.
YAN H H,WEN Y,WANG D. Effects of basal fertilization in strips at different soil depths on flag leaf senescence and pho-

- tosynthetic characteristics, grain yield and fertilizer use efficiency of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(5): 813.
- [10] 孟祥萍. 麦玉两熟制下氮肥与秸秆还田的农田碳氮固持和温室气体减排效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
MENG X P. Study on carbon and nitrogen sequestration and greenhouse gas emissions reduction effects of nitrogen fertilizer and straw return in wheat-maize cropping system [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [11] 冯昊翔. 施肥模式对冬小麦生长发育、产量品质及氮素利用的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2024.
FENG H X. Effects of fertilization patterns on growth, yield, quality and nitrogen utilization of winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [12] 熊淑萍, 吴延鹏, 王小纯, 等. 减氮处理对不同小麦品种干物质积累及氮素转运特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(8): 1134.
XIONG S P, WU Y P, WANG X C, et al. Effect of lower nitrogen application on dry matter accumulation and nitrogen translocation of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8): 1134.
- [13] GAIHRE Y K, SINGH U, MOFIJUL ISLAM S M, et al. Impacts of urea deep placement on nitrous oxide and nitric oxide emissions from rice fields in Bangladesh [J]. *Geoderma*, 2015, 259: 370.
- [14] 任笑媛. 玉米种肥一体施肥方式肥料利用率的研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(18): 113.
REN X Y. Study on fertilizer utilization ratio of integrated fertilization method of maize seed and fertilizer [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(18): 113.
- [15] 吕殿青, 高华, 方日尧, 等. 渭北旱塬冬小麦产区提前深耕一次深施肥料的肥水效应与理论分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 269.
LÜ D Q, GAO H, FANG R Y, et al. Effect of water-fertilizer and theoretical analysis of deep plough-deep fertilization at one earlier time in winter wheat-growing regions of Weiwei rainfed croplands [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 269.
- [16] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 旱地化肥分层和深施对春小麦水肥利用及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(17): 3289.
HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of deep and layered application of reduced chemical nitrogen fertilizer on water, nutrient utilization and yield of spring wheat in rainfed arid area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3289.
- [17] 卜明娜, 杨习文, 滕政凯, 等. 不同灌水条件下分层施肥对土壤养分垂直分布与小麦根系生长和功能的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(11): 2125.
BU M N, YANG X W, TENG Z K, et al. Effects of layered fertilization under different irrigation conditions on vertical distribution of soil nutrients and root growth and function of wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(11): 2125.
- [18] LIU C H, PANG S Y, LI X F, et al. Nitrogen losses trade-offs through layered fertilization to improve nitrogen nutrition status and net economic benefit in wheat-maize rotation system [J]. *Field Crops Research*, 2024, 312: 109406.
- [19] 张永清, 苗果院. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 72.
ZHANG Y Q, MIAO G Y. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 72.
- [20] 刘德坤, 张雅芬, 骆瑶倩, 等. 机械深施基肥对麦季氮肥利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 235.
LIU D K, ZHANG Y F, LUO Y Q, et al. Impacts of mechanical deep application of base fertilizer on nitrogen use efficiency of wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(17): 235.
- [21] 王东, 温樱. 双旋耕按比例分层施肥宽苗幅精量播种机: CN105557102B[P]. 2017-08-04.
WANG D, WEN Y. Double rotary plowingproportional layering fertilization wide row spacing precision seeding machine: CN05557102B [P]. 2017-08-04.
- [22] MORADI L, SIOSEMARDEH A, SOHRABI Y, et al. Dry matter remobilization and associated traits, grain yield stability, N utilization, and grain protein concentration in wheat cultivars under supplemental irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107449.
- [23] 李娜, 田云龙, 张蕾, 等. 中国化肥减量增效行动与技术研究[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(1): 1.
LI N, TIAN Y L, ZHANG L, et al. Research on action and technology for reducing fertilizer usage and enhancing efficiency in China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(1): 1.
- [24] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1827.
TANG J W, XU J K, WEN Y C, et al. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1827.
- [25] LIU P, YAN H H, XU S N, et al. Moderately deep banding of phosphorus enhanced winter wheat yield by improving phosphorus availability, root spatial distribution, and growth [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105388.
- [26] 曹议丹, 钱麟君, 孙玉洁, 等. 缓释肥分层减施对花生田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 217.
CAO Y D, QIAN L J, SUN Y J, et al. Effects of slow-release fertilizer reduction and layered application on the greenhouse gas emission characteristics of peanut fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(1): 217.
- [27] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 56.

- CAO B, DING Z J, HOU J, *et al.* Effects of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers combined with dense planting on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in a paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 56.
- [28] 孙旭. 减氮对麦玉复种模式下作物群体生长及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024.
- SUN X. Effect of nitrogen reduction on the growth and yield of crop population under wheat-soybean intercropping mode [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.
- [29] 贾可, 刘建玲, 沈兵. 近14年北方冬小麦肥料产量效应变化及优化施肥方案[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2032.
- JIA K, LIU J L, SHEN B. Yield effect change of fertilizers in the past 14 years and optimized fertilization of winter wheat in north of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 2032.
- [30] 李文倩, 张海军, 韩明明, 等. 秸秆还田条件下耕作措施与施氮量对冬小麦干物质积累转运及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(34): 1.
- LI W Q, ZHANG H J, HAN M M, *et al.* Effects of tillage practices and nitrogen rates on dry matter accumulation and remobilization and grain yield of winter wheat under straw returning treatment [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(34): 1.
- [31] 张文静, 江东国, 黄正来, 等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 164.
- ZHANG W J, JIANG D G, HUANG Z L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure traits, grain yield and quality of wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 164.
- [32] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 施氮量和行距对冬小麦产量及生理特性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 805.
- GUO M M, ZHAO G C, GUO W S, *et al.* Effects of nitrogen rate and row spacing on grain yield and physiological characteristics of winter wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(4): 805.
- [33] 张锋, 张志文, 梁雪齐, 等. 密度对匀播冬小麦群体动态及干物质积累分配的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(9): 36.
- ZHANG F, ZHANG Z W, LIANG X Q, *et al.* Effects of planting density on population dynamics and dry matter accumulation and distribution of uniformly sowed winter wheat [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(9): 36.
- [34] 康娟. 冬小麦优化栽培技术模式的产效协同效应和机制研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2023.
- KANG J. Studies on synergistic effect and mechanisms of yield and efficiency in optimized cultivation technology of winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [35] 黄玲, 赵凯, 邵敏敏, 等. 高产小麦群体动态及干物质积累与转运特性分析[J]. 山东农业科学, 2021, 53(5): 162.
- HUANG L, ZHAO K, SHAO M M, *et al.* Population dynamics and characteristics of dry matter accumulation and translocation of high-yielding wheat cultivars [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(5): 162.
- [36] 温樱. 底肥按比例分层条施调控冬小麦产量形成的生理基础[D]. 泰安:山东农业大学, 2016.
- WEN Y. Physiological basis for regulation of basic fertilizer layered with stripes in proportion to soil depth on winter wheat yield formation [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.
- [37] 刘林业, 王壮壮, 谷丰序, 等. 播种方式对冬小麦群体光合特性、氮素积累转运及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(10): 28.
- LIU L Y, WANG Z Z, GU F X, *et al.* Effects of seeding methods on population photosynthetic characteristics, nitrogen accumulation and transport and yield of winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(10): 28.
- [38] 刘万代, 张倩, 汪大伟. 氮肥基追比对不同成熟型小麦叶片衰老及产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2015(3): 21.
- LIU W D, ZHANG Q, WANG D W. Effects of nitrogen-based recovery ratio on the leaf senescence and the yield of different maturing phases of wheat [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(3): 21.