



农业资源与环境学报

Journal of Agricultural Resources and Environment

ISSN 2095-6819, CN 12-1437/S

《农业资源与环境学报》网络首发论文

题目：长期氮素运筹对河南冬小麦产量、品质和氮素利用效率的影响
作者：朱涵珍，梅四卫，杨习文
DOI：10.13254/j.jare.2026.0408
收稿日期：2026-04-10
网络首发日期：2026-06-25
引用格式：朱涵珍，梅四卫，杨习文. 长期氮素运筹对河南冬小麦产量、品质和氮素利用效率的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报.
<https://doi.org/10.13254/j.jare.2026.0408>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

长期氮素运筹对河南冬小麦产量、品质和氮素利用效率的影响¹

朱涵珍^{1,2}, 梅四卫^{1,2*}, 杨习文²

(1.河南农业职业学院现代种业学院, 郑州 451450; 2.河南农业大学农学院, 郑州 450000)

摘要: 为探究氮肥运筹对河南冬小麦产量、品质及氮素利用的影响, 本研究以郑麦1860为材料, 于2023—2025年开展田间试验。设3个基追比例(5:4、3:3、4:5)和3个施氮量(100、200、300 kg hm⁻²), 分析二者及其交互作用对产量、品质及氮肥效率的影响。结果表明, 氮肥处理均显著提高了冬小麦产量、品质和氮素利用效率, 其中以 N2(施氮量200 kg hm⁻²)处理效果最为显著($P<0.05$)。与此同时, 基追比例均显著提高了冬小麦产量、品质和氮素利用效率, 其中以 R2(氮素基追比例为3:3)处理提高效果最为显著($P<0.05$)。通过交互作用分析可知, 基追比例、施氮量及其交互作用能够显著提高冬小麦氮素利用效率和产量, 并且对冬小麦的品质提升具有促进作用, 以 N2R2处理效果最佳。这主要是因为适宜的施氮量与基追比例优化了光合物质积累, 提高了谷蛋白与醇溶蛋白比例, 减少了土壤硝态氮残留和淋溶损失, 增加了植株吸氮量。综合来看, 施氮量对冬小麦产量有显著负向影响, 基追比例通过影响氮素利用效率对冬小麦产量有显著正向影响, 同时考虑冬小麦综合产量和氮素利用效率, 本研究中基追比例3:3并且施氮量200 kg hm⁻²是实现河南地区小麦优质高产的最佳氮素运筹配比。

关键词: 冬小麦; 施氮; 氮素利用效率; 品质; 产量

DOI:10.13254/j.jare.2026.0408

Effects of long-term nitrogen management on the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat in Henan

Zhu Hanzhen^{1,2}, Mei Siwei^{1,2*}, Yang Xiwen²

(1.School of Modern Seed Industry, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China; 2.College of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: This study aimed to elucidate the effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen translocation, dry matter accumulation, yield, and quality of winter wheat in Henan Province, using the cultivar Zhengmai 1860. Under three nitrogen application rates (100, 200, 300 kg hm⁻²) and three nitrogen base-topdressing ratios (5:4, 3:3, 4:5) combinations of nitrogen fertilizer management models, the effects of nitrogen application rate and base-topdressing ratio on the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat were analyzed for three consecutive years. The results showed that all nitrogen treatments significantly increased the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat, among which the N2 treatment (nitrogen application rate of 200 kg hm⁻²) had the most significant effect ($P<0.05$). At the same time, the base-topdressing ratio had a significant effect on the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat. All base-topdressing ratios significantly increased the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat, among which the R2 treatment (nitrogen base-topdressing ratio of 3:3) had the most significant effect ($P<0.05$). Through interaction analysis, it was found that nitrogen application

收稿日期: 2026-04-10 录用日期: 2026-06-24

作者简介: 朱涵珍(1974—), 女, 河南杞县人, 硕士, 副教授, 从事作物高产生理研究。Email: zhuzhen41@163.com

通讯作者: 梅四卫 Email:meisiwei@126.com

基金项目: 河南省科技特派员助力乡村振兴五年行动计划(2021—2025)玉米高密高效化控栽培技术(101087)

rate, base-topdressing ratio and their interaction could significantly increase the yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat, and the improvement effect on quality showed an upward trend, with the N2R2 treatment having the best effect. In general, nitrogen application rate had a significant negative effect on the yield of winter wheat, while base-topdressing ratio had a significant positive effect on the yield of winter wheat by affecting nitrogen use efficiency. Considering both increasing yield and nitrogen use efficiency, a nitrogen application rate of 200 kg hm⁻² and a base-topdressing ratio of 3:3 can be used as the best nitrogen fertilizer management model for achieving high yield and quality of wheat.

Keywords: Winter wheat; nitrogen application; nitrogen utilization efficiency ;quality; yeild

小麦是全球主要口粮,约 35%~40%的人口以小麦为主食^[1-3]。河南省作为我国冬小麦核心产区,其生产对保障中原地区乃至全国粮食安全至关重要^[4]。然而,小麦中过量施氮现象普遍,导致氮肥投入与产量、品质提升不同步,氮素利用效率下降。1999—2025 年,我国小麦总产量增长 18.2%,而化肥用量却增加 31.0%^[5],氮肥投入与产出效益之间的矛盾日益突出。氮素是作物生长与产量形成的关键驱动因子。合理施用氮肥可显著提高小麦籽粒产量与干物质量,并优化氮素吸收与分配,从而改善小麦品质^[6]。其中,施氮量与基追比例是氮肥管理的核心要素,二者协同优化对调控氮素与干物质积累、转运及产量品质形成具有重要作用。

氮素对冬小麦产量形成和品质调控起着决定性作用,长期以来,为追求高产,我国冬小麦生产中普遍存在氮肥过量施用现象,不仅导致氮肥利用效率低下,还引发了土壤酸化、水体富营养化等一系列环境问题^[7-8]。如何在保障小麦产量的同时提高氮素利用效率、降低环境风险,已成为农业可持续发展研究的热点。氮肥运筹作为调控作物氮素吸收利用的关键技术手段,通过优化施氮时期、比例和方式,可实现氮素供应与作物需求的时空匹配,从而协同提高产量和氮肥利用效率^[9]。已有研究表明,分期供氮模式较传统一次性基施可显著改善小麦群体结构,促进穗粒数、质量等产量构成因素的协调发展,使氮肥利用率提高 10%~23%。关于氮肥运筹对冬小麦产量和氮素利用效率的影响,前人已开展大量研究并取得重要进展^[10-11]。在短期试验条件下,氮肥后移(即增加生育中后期追肥比例)被证实能够有效延缓叶片衰老、促进花后光合产物积累,进而提高籽粒产量和氮素吸收效率^[12]。此外,氮肥管理对小麦品质的调控作用同样不容忽视,追氮时期和比例直接影响籽粒蛋白质及其组分含量、谷蛋白大聚集体形成以及面团流变学特性,进而决定小麦的加工品质。

长期定位试验能够揭示氮肥运筹措施的累积效应和后期效果,反映土壤-作物系统对施肥管理的综合响应,具有短期试验不可替代的优势^[4]。已有 13 年的定位研究表明,综合农艺优化模式通过增加种植密度、推迟播期和减少氮肥投入,可在维持土壤团聚体稳定性和提高土壤有机质含量的同时,使冬小麦产量较传统农户模式提高 22.52%,氮素利用效率提升 35.61%^[13]。这一结果提示,长期氮素运筹不仅影响当季作物生产,还通过调控土壤质量演变对作物产生持续性影响^[14]。然而,目前关于长期不同氮肥运筹模式下冬小麦产量、品质和氮素利用效率机制尚不明确,特别是在不同基追比例与施氮量交互作用对产量、品质及氮素利用效率的调控机制方面,缺乏田间试验数据的明确支撑。

河南省是我国重要的冬小麦主产省,播种面积和总产量常年位居全国前列,对保障国家粮食安全具有举足轻重的战略意义。然而,河南麦区地域跨度大,从豫北的潮土区到豫南的砂姜黑土区,土壤类型、气候条件和水资源差异显著,导致氮肥运筹对冬小麦产量、品质及氮素利用效率的影响呈现出明显的区域特异性。在豫北地区,已有研究以中麦 578 为材料发现,基肥与拔节肥比例为 5:5 时产量和氮素利用率表现最佳^[12];而在豫中地区,基追比 4:5 更有利于获得高产,施氮量以 270 kg·hm⁻²左右较为合理^[5]。在黄淮海平原地区,施中量氮肥(180 kg·hm⁻²)即可获得较高的产量和品质^[11]。这些研究充分说明,不同区域的土壤肥力

基础、降水条件和灌溉管理水平差异较大，导致氮肥的施用量和基追配比难以界定。因此，本研究以郑麦 1860 为材料，设置 3 个施氮量（100、200、300 kg hm⁻²）和 3 个基追比例（5:4、3:3、4:5），连续三年分析氮素吸收特征、肥料利用效率、产量表现与品质性状对氮肥管理的响应规律，明确冬小麦最优氮肥调控方案，以期协同实现高产、优质与高效生产目标提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验于 2023—2025 年在河南农业大学农学院野外实验基地进行（34.795° N, 113.662° E）。供试沙壤土地势平坦，土层深厚，排灌便利，肥力中等偏上。播种前耕层土壤基础养分条件：土壤 pH 6.7，有机碳、全氮、全磷、有效氮和有效磷含量分别为 12.3 g kg⁻¹、1.54 g kg⁻¹、0.93 g kg⁻¹、32.3 mg kg⁻¹ 和 21.3 mg kg⁻¹。

1.2 实验设计

以冬小麦品种郑麦 1860 作为供试材料，试验采用施氮量与基追比例二因素裂区设计。主区设置不同施氮水平，包括不施氮对照（N0），以及 100（N1）、200（N2）、300（N3）kg·hm⁻² 三个施氮梯度；副区设置三种基肥与追肥配比，分别为 5:4（R1）、3:3（R2）和 4:5（R3）。每个处理重复 3 次。氮肥为尿素（含氮量 46%），磷肥（P₂O₅）和钾肥（K₂O）均作基肥一次性施入，用量分别为 100 kg hm⁻² 和 200 kg hm⁻²。小区四周埋设 50 cm 高的隔离板，深入土下 20 cm。每小区面积为 20 m²，基本苗 350×10⁴ 株 hm⁻²。

1.3 植株氮含量测定及相关指标计算

本研究分别于分蘖期、拔节期、开花期和成熟期 4 个关键生育时期，在各试验小区内随机选取 20 个具有代表性的单株，将植株样品按根、茎、叶、穗等器官进行分离处理，以测定不同器官的氮素积累与分配特征。采集的样品首先于 105 °C 烘箱中杀青处理 60 min，随后将温度调至 80 °C 烘干至质量恒定，经粉碎并过筛后，采用半微量凯氏定氮法测定各器官的氮素含量。相关氮素利用效率指标计算如下^[15]：

氮肥表观利用率=(施肥处理氮素吸收量-不施肥处理氮素吸收量)/施氮量×100%

氮肥偏生产力=施肥处理籽粒产量/施氮量

氮素农学效率=(施肥处理籽粒产量-不施肥处理籽粒产量)/施氮量×100%

氮素生理效率=(施肥处理籽粒产量-不施肥处理籽粒产量)/(施肥处理氮吸收量-不施肥处理氮吸收量)×100%

1.4 产量及其构成因素测定

于小麦成熟期，每小区选取 2 个代表性样段（每样段长 1 m）调查有效穗数，有效穗判定标准为穗粒数大于 5 粒。每样段连续取 20 穗测定穗粒数，各处理重复 3 次^[16]。千粒重按 13% 标准水分折算。收获时采用小区联合收割机实收计产，籽粒经自然晾晒至质量恒定后称量，每处理设置 3 次重复。

1.5 籽粒品质指标测定

蛋白质含量测定采用近红外谷物分析仪，参照美国谷物化学师协会标准 AACC 39 号方法进行；湿面筋含量使用面筋洗涤仪测定，具体操作依据 AACC 38 号标准方法执行；沉降值采用十二烷基硫酸钠（SDS）常量法测定，以评价小麦面粉的烘焙品质；籽粒硬度使用 JYDB100X40 型硬度仪测定；籽粒容重采用 HGT-1000 型容重仪测定^[17]。

采用 Excel 2007 与 SPSS 21.0 进行数据处理。各处理间差异显著性通过单因素方差分析结合 LSD 多重比较方法进行检验，显著性水平取 0.05。所有统计结果均为 3 年试验数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹对冬小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,连续 3 年的平均结果表明施氮量对冬小麦产量具有显著影响,与 N0 处理相比,氮肥处理均显著提高了冬小麦产量,其中以 N2 (施氮量 200 kg hm⁻²) 处理效果最为显著。与此同时,基追比例对冬小麦产量具有显著影响,基追比例显著提高了冬小麦产量,其中以 R2 (氮素基追比例为 3:3) 处理效果最为显著。通过交互作用分析可知,施氮量和基追比例及其交互作用显著能够显著提高冬小麦产量,以 N2R2 处理效果最佳。

表1 氮肥运筹对冬小麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of nitrogen fertilizer management on winter wheat yield and its components				
处理 Treatment	穗数 Spike number/ (10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/ (g)	产量 Yield/ (kg hm ⁻²)
N0	320.2±23.4d	21.3±1.5d	30.2±2.5c	2 343±154d
N1R1	334.5±28.7c	22.5±2.3b	32.4±3.2b	5 432±287c
N1R2	354.4±34.2a	24.9±2.7a	36.5±3.4a	6 342±167a
N1R3	341.2±37.7b	23.1±2.4b	33.1±2.5b	5 987±243b
N2R1	349.7±38.7b	23.6±1.6c	35.8±2.9b	5 988±123c
N2R2	356.8±23.1a	26.7±3.2a	39.7±3.6a	6 981±214a
N2R3	351.2±29.8b	24.3±3.1b	36.2±3.1b	6 345±265b
N3R1	328.5±37.6c	22.9±2.7b	33.5±3.6b	5 124±118c
N3R2	346.6±32.1a	25.2±2.9a	35.6±4.2a	6 098±198a
N3R3	338.4±30.3b	23.1±3.1b	34.1±4.1b	5 532±321b
F值				
N	77.6*	154.5**	203.4**	116.5**
R	175.4**	165.4**	87.7*	124.4**
N×R	197.4**	87.7*	102.**	115.5**

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）；*表示交互因素影响差异显著（ $P<0.05$ ），**表示交互因素影响差异显著（ $P<0.01$ ）。下同。

2.2 氮肥运筹对冬小麦品质的影响

由表 2 可知,施氮量对冬小麦品质产生显著影响,与 N0 处理相比,氮肥处理均显著提高了冬小麦品质,其中以 N2 (施氮量 200 kg hm⁻²) 处理效果最为显著。与此同时,基追比例对冬小麦品质具有显著影响,基追比例显著提高了冬小麦品质,其中以 R2 (氮素基追比例为 3:3) 处理效果最为显著。通过交互作用分析可知,施氮量和基追比例及其交互作用能够显著提高冬小麦品质,以 N2R2 处理效果最佳。

表2 氮肥运筹对冬小麦品质的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer management on winter wheat quality				
处理 Treatment	湿面筋 Wet gluten/ (%)	稳定时间 Stability time/ (min)	形成时间 Development time/ (min)	沉降值 Sedimentation value/ (mL)
N0	23.2±3.2d	4.3±0.7d	1.53±0.23d	14.3±2.3d
N1R1	25.4±2.1b	4.8±0.9b	1.65±0.12c	15.6±2.6c
N1R2	28.9±2.9a	5.9±0.6a	1.98±0.15a	18.7±1.5a
N1R3	26.1±3.2b	5.1±0.5b	1.76±0.13b	16.2±3.2b

N2R1	29.8±2.1c	5.6±0.4b	1.87±0.16c	17.8±1.6c
N2R2	33.4±1.6a	7.3±0.6a	2.11±0.23a	21.2±2.9a
N2R3	31.1±3.2b	5.9±0.7b	1.94±0.25b	19.8±4.3b
N3R1	24.5±3.3b	5.1±0.4b	1.66±0.27c	15.7±3.2b
N3R2	27.6±3.8a	6.3±0.3a	1.97±0.22a	18.7±3.6a
N3R3	25.1±2.5b	5.2±0.6b	1.85±0.31b	16.5±3.1b
F值				
N	95.4*	187.5**	123.3**	67.7*
R	209.2**	198.4**	87.8*	98.3*
N×R	109.3*	78.8*	112.3*	109.5**

由表 3 可知，连续 3 年的平均结果表明施氮量对小麦有机物具有显著影响，与 N0 处理相比，氮肥处理均显著提高了粗蛋白、粗淀粉、粗脂肪、还原糖含量，其中以 N2（施氮量 200 kg hm⁻²）处理效果最为显著。与此同时，基追比例对小麦有机物具有显著影响，基追比例均显著提高了粗蛋白、粗淀粉、粗脂肪、还原糖的含量，其中以 R2（氮素基追比例为 3:3）处理效果最为显著。通过交互作用分析可知，施氮量和基追比例及其交互作用显著能够显著提高小麦有机物含量，增加籽粒中粗蛋白、粗淀粉、粗脂肪、还原糖的含量，对品质的提升效果呈上升趋势，以 N2R2 处理效果最佳。

表3 氮肥运筹对冬小麦有机物的影响

Table 3 Effects of nitrogen fertilizer management on organic matter in winter wheat

处理Treatment	粗脂肪 Crude fat/ (%)	粗蛋白 Crude protein/ (%)	粗淀粉 Crude starch/ (%)	还原糖 Reducing sugar/ (%)
N0	3.2±0.2c	10.2±1.3d	70.5±3.2c	2.1±0.3c
N1R1	3.6±0.4b	11.3±1.5b	72.3±5.4b	2.7±0.3b
N1R2	4.3±0.2a	12.4±2.3a	75.4±3.5a	3.2±0.2a
N1R3	3.9±0.5b	11.5±2.3b	73.1±4.6b	2.9±0.4b
N2R1	4.1±0.6b	12.5±2.1c	74.4±5.7b	3.6±0.2b
N2R2	5.3±0.5a	14.3±1.9a	79.8±6.4a	4.7±0.2a
N2R3	4.3±0.4b	13.2±1.5b	75.4±5.2b	3.9±0.5b
N3R1	3.8±0.4b	10.6±2.1c	71.3±4.3b	3.1±0.2b
N3R2	4.5±0.6a	11.4±2.6a	74.2±4.9a	3.5±0.3a
N3R3	4.2±0.4b	11.2±2.3b	72.1±5.5b	3.3±0.2b
N	134.2**	234.3**	189.3**	187.6**
R	87.6*	109.3**	76.5*	104.2**
N×R	98.3*	102.3**	87.7*	93.2*

2.3 氮肥运筹对冬小麦氮素吸收量的影响

由表 4 可知，连续 3 年的平均结果表明施氮量对不同生长期小麦氮素吸收量具有显著影响，与 N0 处理相比，氮肥处理均显著提高了氮素吸收量，其中以 N2（施氮量 200 kg hm⁻²）处理效果最为显著。与此同时，基追比例对小麦氮素吸收量具有显著影响，基追比例显著提高了氮素吸收量，其中以 R2（氮素基追比例为 3:3）处理效果最为显著。通过交互作用分析可知，施氮量和基追比例及其交互作用显著能够显著提高不同生长期小麦氮素吸收量，以 N2R2 处理效果最佳。

表4 氮肥运筹对冬小麦氮素吸收率的影响

Table 4 Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen uptake rate in winter wheat

处理	分蘖期	拔节期	开花期	成熟期
Treatment	Tillering stage/(%)	Jointing stage/(%)	Flowering stage/(%)	Maturity stage/(%)
N0	23.1±2.3c	45.3±4.5d	83.2±6.5d	46.3±3.2d
N1R1	25.2±2.7b	46.7±5.4c	84.4±7.6b	48.4±4.5b
N1R2	27.4±1.6a	48.6±4.2a	87.8±7.4a	51.2±5.4a
N1R3	25.3±2.5b	47.5±4.2b	85.6±8.2b	48.9±5.3b
N2R1	27.5±2.8b	48.9±5.4c	87.8±7.8c	51.3±5.8c
N2R2	30.3±3.1a	52.3±3.8a	91.2±6.7a	56.5±4.2a
N2R3	28.3±3.4b	49.6±4.7b	88.7±8.3b	52.1±3.9b
N3R1	25.4±2.8b	47.6±4.6b	85.3±9.2c	48.9±6.5c
N3R2	28.6±3.6a	49.7±3.9a	88.4±6.5a	53.2±6.3a
N3R3	25.1±3.3b	48.1±4.1b	86.7±5.4b	49.3±5.2b
F值				
N	232.4**	187.3**	156.3**	201.3**
R	109.5*	89.4*	67.7*	90.8*
N×R	98.7*	109.3**	112.3*	78.6*

由表 5 可知，施氮量和基追比例显著影响小麦的氮素利用效率指标。与不施氮（N0）相比，氮肥均显著提高了氮肥偏生产力、氮素农学效率、氮素生理效率和氮素表观利用率，其中以 N2 处理效果最为显著。与此同时，基追比例对以上 4 个指标也产生正向效应，其中以 R2 处理效果最为显著。通过交互作用分析可知，施氮量和基追比例及其交互作用显著能够显著提高小麦氮肥利用效率，以 N2R2 处理效果最佳。

表5 氮肥运筹对冬小麦氮素吸收率的影响

Table 5 Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen uptake rate in winter wheat

处理	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of nitrogen fertilizer/ (kg kg ⁻¹)	氮素农学效率 Agronomic efficiency of nitrogen/ (%)	氮素生理效率 Physiological efficiency of nitrogen/ (%)	氮素表观利用率 Apparent recovery efficiency of nitrogen/ (%)
Treatment				
N0	23.4±3.2d	45.3±5.4d	83.2±7.8d	46.3±4.3d
N1R1	25.2±2.1b	47.2±4.3b	85.3±7.4b	48.3±4.5b
N1R2	28.3±2.9a	50.3±3.4a	87.1±6.7a	50.9±5.0a
N1R3	26.4±3.4b	48.1±5.6b	85.2±5.9b	49.1±5.2b
N2R1	27.7±3.1c	49.3±4.3c	87.3±8.4c	50.3±3.5c
N2R2	32.3±1.9a	54.3±5.3a	91.2±5.3a	55.4±4.9a
N2R3	29.3±2.6b	52.2±4.2b	89.0±7.4b	52.3±6.5b
N3R1	24.3±2.0b	46.3±4.1c	84.5±5.3b	48.7±6.2b
N3R2	27.7±3.5a	49.9±6.5a	88.7±7.1a	51.2±4.7a
N3R3	25.2±2.2b	48.3±4.9b	85.8±5.2b	49.0±4.9b
F值				
N	365.2**	201.3**	198.3**	98.7*
R	104.3**	87.6*	125.4**	108.6**
N×R	67.7*	98.7*	103.3**	115.4**

2.4 氮肥运筹对冬小麦氮素分配比率的影响

由表 6 可知，施氮量和基追比例对冬小麦不同器官氮素分配比率影响显著。与 N0 处理

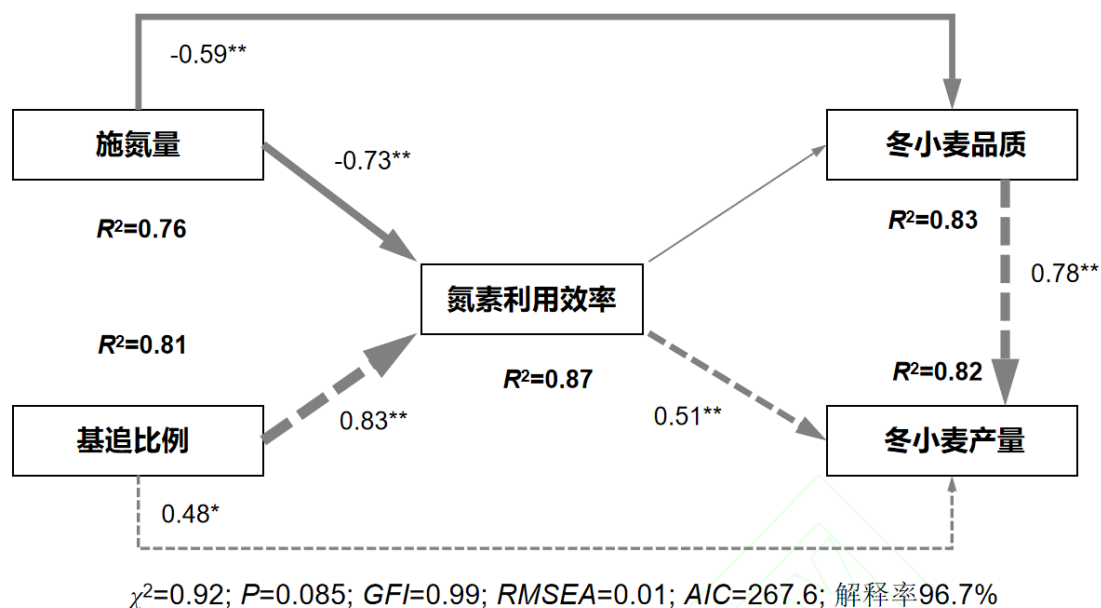
相比，氮肥处理均显著提高了冬小麦不同器官氮素分配比率，其中以 N2 处理效果最为显著。与此同时，基追比例显著提高了冬小麦不同器官氮素分配比率，其中以 R2 处理效果最为显著。通过交互作用分析可知，施氮量和基追比例及其交互作用能够显著提高冬小麦不同器官氮素分配比率，以 N2R2 处理效果最佳。

表6 氮肥运筹对冬小麦氮素分配比率的影响

Table 6 Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen distribution ratio in winter wheat				
处理 Treatment	茎 Stem/ (%)	叶 Leaf/ (%)	穗 Spike (%)	籽粒 Grain (%)
N0	15.2±2.3c	7.4±1.3d	7.9±1.3c	67.5±6.5c
N1R1	17.3±3.8b	8.1±1.5b	8.7±1.8b	69.2±6.9b
N1R2	20.9±2.1a	10.2±2.2a	10.2±2.3a	72.3±7.4a
N1R3	18.1±3.6b	8.5±1.7b	9.1±1.1b	70.1±7.3b
N2R1	20.9±2.6b	10.5±2.0c	10.1±0.8b	71.4±7.8b
N2R2	25.4±3.6a	13.2±2.5a	14.3±1.5a	75.4±8.4a
N2R3	21.3±3.1b	11.1±2.1b	11.9±2.5b	72.3±5.6b
N3R1	18.4±2.9b	8.9±1.5b	9.3±2.4b	69.5±6.3b
N3R2	21.2±3.3a	9.8±1.4a	12.2±2.8a	72.3±7.3a
N3R3	19.0±2.8b	9.1±2.0b	9.9±1.2b	70.1±6.1b
F值				
N	201.3**	109.7**	87.8*	96.5*
R	129.4**	78.8*	105.6**	201.4**
N×R	78.7*	98.0*	113.3**	118.7**

2.5 氮肥运筹下冬小麦氮素利用与产量的关系

采用结构方程模型探讨氮肥运筹下冬小麦氮素利用与产量的关系，图1中卡方自由度比值为0.92，其小于3证明模型适配度较好。施氮量对氮素利用效率有显著负向影响，路径系数为-0.73（ $P<0.01$ ），对冬小麦品质有显著负向影响，路径系数为-0.59（ $P<0.01$ ）。基追比例对冬小麦产量有显著正向影响，路径系数为0.48（ $P<0.05$ ），对氮素利用效率有显著正向影响，路径系数为0.83（ $P<0.01$ ），氮素利用效率对冬小麦产量有显著正向影响，路径系数为0.51（ $P<0.01$ ）。综合来看，施氮量对冬小麦产量有显著负向影响，基追比例通过影响氮素利用效率对冬小麦产量有显著正向影响。



黑色实线箭头表示负相关，黑色虚线箭头表示正相关，箭头的宽度与相关系数呈正比，*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。

图1 氮肥运筹下冬小麦氮素利用与产量的关系

Figure 1 Relationship between nitrogen utilization and yield of winter wheat under nitrogen fertilizer management

3 讨论

3.1 氮肥运筹对冬小麦产量及其构成因素的影响

适量增加氮肥投入可在一定程度上提高冬小麦单位面积穗数，但该效应通常不显著，而且对穗粒数及千粒重的影响亦不显著^[16]。在总施氮量恒定的前提下，增大基施氮肥占比对穗数的形成具有正向促进效应，而将氮素供应重心向生育中后期转移则有助于穗粒数的提升。然而，上述两种氮肥运筹策略对千粒重均未表现出明显的调控作用^[12]。本试验中，与不施氮（N0）处理相比，各施氮处理均显著提高了冬小麦产量，其中以施氮量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ （N2）处理效果最为显著（ $P<0.05$ ）。进一步通过交互作用分析发现，施氮量与基追比例及其交互作用均对产量产生显著影响，其中以N2R2处理组合效果最优，这主要归因于穗数和穗粒数的协同增加，而千粒重的变化相对稳定。具体而言，增施氮肥促进了小麦分蘖成穗，为高产奠定了群体基础；同时，追氮能够有效减少小花退化，提高可孕花数，从而增加穗粒数^[15-17]。然而，过量施氮或追氮比例过高时，通风透光条件恶化，病虫害风险增加，可能导致千粒重下降，最终产量不再增加^[17]。值得注意的是，在本试验条件下，氮肥运筹对穗粒数的影响效应大于千粒重，说明在目标产量构成中穗粒数的可塑性更强。因此，通过合理调控基追比在保证适宜穗数的基础上主攻穗粒数，是小麦实现高产高效的关键途径。

3.2 氮肥运筹对冬小麦品质的影响

氮素作为构成籽粒蛋白质的核心元素，其从营养器官向籽粒的再分配效率直接影响籽粒。研究表明，氮肥利用率随施氮水平的增加呈现先上升后下降的变化趋势。当施氮量控制在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内时，适当增加氮肥投入有助于促进花后干物质积累，并提高营养器官中氮素向籽粒的转运效率；若施氮量超过该阈值，则易导致氮素滞留在营养器官或土壤中，造成肥料资源的浪费与利用效率的下降^[18]。除施氮总量外，基肥与追肥的配比关系亦对氮素利用效率产生显著影响。通过优化氮肥运筹方式，可有效调节氮素在不同生育阶段的分配格局，实现氮素供应与作物需求在时间尺度上的精准匹配。合理的基追配比能够提升氮肥农学效率

与花后干物质积累量,促进营养器官中干物质向籽粒的再分配,从而增强源库协调性。研究表明,适当降低施氮总量并提高基肥占比,可协同提升产量与氮效率,而增加追肥比例对花后干物质贡献率则呈先升后降趋势^[19]。本试验中,施氮量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、基追比3:3处理的氮素利用率、籽粒干物质分配量及花后干物质积累均显著提升,说明适宜的氮肥运筹能够促进氮素向籽粒转运,增强花后物质积累对产量的贡献。值得注意的是,适当提高追肥比例虽然在一定程度上有助于改善氮肥利用效率,但其实际效果受到土壤基础肥力、环境条件及品种特性等多重因素的共同制约^[20]。因此,生产中需因地制宜优化氮肥管理,以实现高产与高效的协同。

施氮量与作物产量之间呈现典型的二次函数关系,适量增施氮肥可促进产量提升,但当施氮水平超过 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,其增产效应逐渐减弱,增幅不再显著^[21-22]。本试验数据表明,小麦产量随施氮量的增加表现为先上升后下降的变化趋势,其中以施氮量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时产量最高。可能是由于过量施氮易导致氮素流失加剧,降低氮肥的回收效率及土壤中的氮素留存能力,从而引发产量下降。此外,对氮肥运筹方式的进一步分析显示,优化施肥策略对产量构成因子具有明显的正向调控作用^[23-25]。施氮量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配合基追比例3:3的处理增产效果最为显著,这可能是由于适宜的基肥比例保障了小麦早期生长发育,有利于形成合理群体结构,从而提高有效穗数。此外,优化施氮与基追比例还能协同提升产量与品质。已有研究表明,在施氮量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、基追比例为6:4的条件下,既可获得较高产量,亦能使籽粒蛋白质含量与湿面筋含量达到弱筋小麦国家规定的标准^[26-27]。本试验中,施氮量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、基追比例3:3的处理不仅产量显著高于其他处理,其籽粒品质同样满足弱筋小麦的指标要求,进一步印证了通过优化氮肥运筹方式实现高产与优质协同提升的可行性。但由于不同地区气候、土壤及品种条件存在差异,在实际生产中需因地制宜地制定适宜的氮肥运筹模式。

3.3 氮肥运筹对冬小麦氮肥利用率的影响

合理运筹氮肥是调控冬小麦氮素积累与转运、提升氮肥利用效率的关键技术途径。小麦植株的氮素积累量随生育进程推进呈持续增长态势,其中拔节至开花期为氮素积累的高峰时期,该阶段积累量约占全生育期积累总量的50%以上^[15]。适量提升施氮水平可促进植株氮素总积累量增加,但过量施氮则对氮素转运效率及其向籽粒的贡献率产生显著抑制,进而削弱氮素的吸收与利用效率^[21]。在施氮总量保持不变的条件下,适当提高追肥比例,既可满足花后光合器官对氮素的需求,亦有利于促进氮素向籽粒及根系分配,从而延缓植株衰老,提高籽粒氮素积累水平^[14]。施氮量与氮肥运筹方式对冬小麦氮素的积累与分配具有重要调控作用。Cui等^[28]研究表明,冬小麦苗期生长缓慢、氮素吸收能力较低,基肥施用过多易因土壤氮浓度过高而造成氮素损失;适度降低基肥比例、增加中后期追肥比例,则有助于提升氮肥利用效率。本试验结果显示,在不同播期条件下,小麦的氮素吸收高峰期均出现在拔节至开花阶段。当施氮量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,植株氮素积累量达至峰值,表明该施氮量能够较好地匹配冬小麦关键生育期的氮素需求。在氮肥运筹方面,基追比例为3:3的处理虽在一定程度上提高了出苗至分蘖期的氮素吸收量,但显著减少了拔节至成熟期的氮素吸收,不利于小麦生育后期氮素的转运与积累。该运筹方式下氮素供应前移,导致后期土壤供氮能力不足,难以满足开花后植株对氮素的持续需求,进而限制了氮素向籽粒的高效转运。

4 结论

本研究基于2023—2025年田间试验,系统分析了不同氮素运筹(基追比例与施氮量)对河南冬小麦(郑麦1860)产量、品质及氮素利用效率的影响,得出以下主要结论:

(1) 适宜施氮量是关键调控因子:施氮量对冬小麦产量、品质及氮素利用效率均有显著提升作用,其中以 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)处理效果最佳。值得注意的是,施氮量对产量的主

效应表现为显著负向影响,表明过量施氮(300 kg hm⁻²)会导致产量和氮素效率下降,存在“报酬递减”现象。

(2) 基追比例优化可协同增效:基追比例对产量、品质及氮素利用效率亦具有显著调控作用,其中以3:3(R₂,即基肥与拔节期追肥等量分配)处理效果最为突出。该比例通过平衡前期营养生长与后期籽粒灌浆的氮素供应,实现了源库关系的优化。

(3) 氮肥的最佳运筹模式:基追比例与施氮量之间存在显著的交互效应,两者协同作用可进一步提升产量、品质及氮素利用效率,其中N₂R₂(施氮量 kg hm⁻² + 基追比3:3)处理表现最优。主要是由于适宜的氮素运筹促进了花后光合物质积累与向籽粒的转运,进而增加了植株氮素吸收总量。综合表明河南地区冬小麦的最佳氮素运筹方案为施氮量200 kg hm⁻²、基追比例3:3。

参考文献:

- [1] 崔振坤, 于振文, 石玉, 等. 水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 160-169. Cui Z K, Yu Z W, Shi Y, et al. Effects of water and nitrogen management on soil nitrogen metabolism enzyme activity and wheat nitrogen utilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 160-169.
- [2] 贺大海, 梁振宇, 陈佳博, 等. 不同轮作模式下氮肥运筹对成都平原冬小麦生长特性及产量的效应[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(5): 630-641. He D H, Liang Z Y, Chen J B, et al. Regulation of nitrogen fertilizer application on growth characteristics and yield of winter wheat under different rotation patterns in Chengdu Plain[J]. Journal of Triticeae Crops, 2025, 45(5): 630-641.
- [3] 周冬冬, 张军, 葛梦婕, 等. 不同氮肥处理对稻茬晚播小麦‘淮麦 36’产量、氮素利用率和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(1): 1-7. Zhou D D, Zhang J, Ge M J, et al. Effects of different nitrogen treatments on grain yield, nitrogen utilization efficiency and quality of late-sowing Wheat ‘Huaimai 36’ Following rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(1): 1-7.
- [4] 王震, 李金秀, 张彬, 等. 小麦玉米一体化氮肥运筹对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1169-1177. Wang Z, Li J X, Zhang B, et al. Effects of different nitrogen applications on yields and nitrogen utilization efficiencies of wheats under integrated nitrogen management for wheat-maize rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(5): 1169-1177.
- [5] 车海涛, 范晓懂, 庞耀悦, 等. 深蓄储水灌溉下氮肥分施对冬小麦生理及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2026, 44(2): 45-56. Che H T, Fan X D, Pang Y Y, et al. Effects of nitrogen splitting on physiology and water-nitrogen use efficiency of winter wheat under deep water storage irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2026, 44(2): 45-56.
- [6] 李传梁, 于振文, 张娟, 等. 测墒补灌条件下施氮量对小麦干物质积累转运和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 1039-1046. Li C L, Yu Z W, Zhang J, et al. Effect of nitrogen application rates on dry matter accumulation, transportation and yield of wheat under the conditions of soil moisture measurement and supplementary irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(8): 1039-1046.
- [7] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 等. 施氮处理对不同筋型小麦产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2020(6): 158-162. Guo D D, Liu Z W, Chang X H, et al. Effects of nitrogen application on

- yield and quality of wheat with different gluten types[J]. *Crops*, 2020(6): 158-162.
- [8] 马尚英, 夏婷婷, 韩鹏彬, 等. 施氮量和施氮方式对宽窄行种植冬小麦氮素吸收利用、产量及土壤氮残留的影响[J]. *河南农业科学*, 2025, 54(8): 38-50. Ma S Y, Xia T T, Han P B, et al. Effects of application rate and method of nitrogen on winter wheat nitrogen uptake and utilization, yield and soil nitrate nitrogen residue under wide-narrow row planting[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(8): 38-50.
- [9] 张晶, 张楠, 张慧芋, 等. 种植密度和氮肥运筹对极晚播小麦茎秆特性和糖积累的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2026, 32(4): 670-681. Zhang J, Zhang N, Zhang H Y, et al. Effect of planting density and nitrogen fertilizer management on stem characteristics and sugar accumulation of late sowing wheat[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2026, 32(4): 670-681.
- [10] 赵咏馨, 刘光亚, 陈广锋, 等. 播种方式和施氮量对小麦氮素利用及加工品质的调控效应[J]. *中国种业*, 2026(4): 123-129. Zhao Y X, Liu G Y, Chen G F, et al. Effects of sowing method and nitrogen application rate on nitrogen utilization and processing quality of wheat[J]. *China Seed Industry*, 2026(4): 123-129.
- [11] Herlinawati E, Lei X X, Yang M L, et al. Variety-dependent yield and physiological responses to combined inorganic and organic sources of nitrogen in wheat[J]. *Agronomy*, 2025, 15(7): 1679.
- [12] Huang X M, Xu X P, Zhu Q C, et al. Optimizing water and nitrogen inputs for sustainable wheat yields and minimal environmental impacts[J]. *Agricultural Systems*, 2024, 220: 104061.
- [13] Ahmed U, Jamal A, Iqbal W, et al. Integrated management of nitrogen and spent mushroom compost for improved wheat yield and soil fertility[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25(2): 3354-3371.
- [14] Belete F, Dechassa N, Molla A, et al. Effect of nitrogen fertilizer rates on grain yield and nitrogen uptake and use efficiency of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties on the Vertisols of central Highlands of Ethiopia[J]. *Agriculture & Food Security*, 2018, 7: 78.
- [15] Kitila K, Workina M. Effect of integrated application of vermicompost and inorganic fertilizer on yield and yield components of bread wheat in shashemene district of west arsi zone, Ethiopia[J]. *International Journal of Environmental Chemistry*, 2023;13:29-37.
- [16] Dwivedi B S, Singh V K, Meena M C, et al. Integrated nutrient management for enhancing nitrogen use efficiency[J]. *Indian Journal of Fertilisers*, 2016, 12(4): 62-71.
- [17] Fiez T E, Pan W L, Miller B C. Nitrogen use efficiency of winter wheat among landscape positions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(6): 1666-1671.
- [18] Huggins D R, Pan W L. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(4): 898-905.
- [19] 景娜, 高玉红, 张巧霞, 等. 氮肥运筹对旱地胡麻氮代谢及氮肥利用的调控效应[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(1): 143-154. Jing N, Gao Y H, Zhang Q X, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on N metabolism and utilization of oilseed flax in dryland[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(1): 143-154.
- [20] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [21] Hawkesford M J. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3): 276-283.

- [22] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 357-363.
- [23] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 132-140.
- [24] Foulkes M J, Hawkesford M J, Barraclough P B, et al. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: recent advances and future prospects[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 329-342.
- [25] Dreccer M F, Schapendonk A H C M, Slafer G A, et al. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield[J]. Plant and Soil, 2000, 220(1/2): 189-205.
- [26] Barraclough P B, Howarth J R, Jones J, et al. Nitrogen efficiency of wheat: genotypic and environmental variation and prospects for improvement[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 33(1): 1-11.
- [27] Hirel B, Tétu T, Lea P J, et al. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture[J]. Sustainability, 2011, 3(9): 1452-1485.
- [28] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test[J]. Field Crops Research, 2008, 105(1/2): 48-55.