

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51084

豫东南黏壤潮土区水氮优化协同提高冬小麦产量和氮素利用效率

王壮壮¹ 武紫君² 张永新² 张芯源² 袁丽雪² 陈如雪² 刘世举^{2,3,*}
段剑钊^{2,3} 冯伟^{2,3} 王同朝^{1,2,*} 王永华^{2,3,*}

¹ 河南农业大学资源与环境学院, 河南郑州 450046; ² 河南农业大学农学院 / 国家小麦工程技术研究中心, 河南郑州 450046; ³ 小麦玉米两熟高效生产全国重点实验室, 河南郑州 450046

摘 要: 为缓解豫东南黏壤潮土区冬小麦生产因降水不均与氮肥过量施用引起的产量波动大、氮肥利用效率低等问题, 本研究通过 2 年裂区试验, 设置水分主区(雨养 W0; 拔节+开花期补灌 W2, 每次 75 mm)和氮肥副区(0、180、240、300、360 kg hm⁻² N, 分别记为 N0、N1、N2、N3、N4), 系统探究水氮协同对冬小麦干物质生产、氮素利用及产量的调控效应。结果表明, W2 处理显著促进花后干物质同化, 开花—灌浆阶段的干物质积累量较 W0 平均提高 32.2%, 总干物质积累量平均增加 28.1%; 同时氮素吸收效率与氮肥偏生产力分别平均提升 26.7%和 25.5%。水氮互作通过协调整控花前氮素转运与花后同化物分配, 进而同步优化了产量构成三要素。在最优水氮组合(W2N2)下, 单位面积穗数、穗粒数和千粒重分别平均达 615.0×10⁴ hm⁻²、43.9 粒 穗⁻¹和 45.6 g, 与传统高氮模式(W2N4)相比, 穗粒数与千粒重分别平均提高 2.0%和 2.3%; 与雨养减氮模式(W0N2)相比, 穗数与穗粒数分别平均提高 11.1%和 34.6%。这说明 W2 主要通过提升穗数和穗粒数实现增产, 而氮肥减量至 N2 能在稳定穗数的基础上优化穗粒数并维持较高千粒重, 形成“穗数奠基、穗粒主导、粒重维稳”的协同增产模式。该模式下产量最高平均达 9331.8 kg hm⁻², 氮肥偏生产力与氮肥农学效率较传统施氮量(360 kg hm⁻² N)分别平均提高 61.2%和 67.9%。在土壤环境效应方面, 补灌处理改变了硝态氮的垂直分布, 0~40 cm 土层残留量平均降低 23.4%, 而 40~100 cm 土层残留量平均增加 32.2%, 表明单纯优化灌溉可能促使氮素向深层迁移。然而, 结合氮肥减量至 N2 可协同降低 0~100 cm 剖面硝态氮累积量平均达 26.9%, 有效缓解淋溶风险。综上, 拔节+开花期各补灌 75 mm 并减氮至 240 kg hm⁻² N, 可通过水分调控氮素在作物-土壤系统中的合理分布, 在协同提升产量与氮肥利用效率的同时, 为豫东南黏壤潮土区冬小麦高产高效生产提供一种可推广的水氮协同优化技术模式。

关键词: 冬小麦; 水氮协同; 拔节+开花期补灌; 干物质分配; 减氮增效; 产量构成

Optimized water-nitrogen synergy enhances winter wheat yield and nitrogen use efficiency in clay-loam fluvo-aquic soils of southeastern Henan, China

Wang Zhuang-Zhuang¹, Wu Zi-Jun², Zhang Yong-Xin², Zhang Xin-Yuan², Yuan Li-Xue², Chen Ru-Xue², Liu Shi-Ju^{2,3,*}, Duan Jian-Zhao^{2,3}, Feng Wei^{2,3}, Wang Tong-Chao^{1,2,*}, and Wang Yong-Hua^{2,3,*}

¹ College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; ² College of Agronomy, Henan Agricultural University / National Engineering Research Centre for Wheat, Zhengzhou 450046, Henan, China; ³ State Key Laboratory of High-Efficiency Production of Wheat-Maize Double Cropping, Zhengzhou 450046, Henan, China

本研究由国家重点研发计划项目(2023YFD2300204), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03)和河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(242102111084)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD2300204), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-03), and the Henan Province Key R&D and Promotion Special Project (Science and Technology Tackling) (242102111084).

* 通信作者(Corresponding authors): 刘世举, E-mail: liushiju0229@163.com; 王同朝, E-mail: wtcwrn@126.com; 王永华, E-mail: wangyonghua@henau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 15737315382@163.com

Received (收稿日期): 2025-09-29; Accepted (接受日期): 2026-02-27; Published online (网络出版日期): 2026-03-06.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260305.1644.014>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Abstract: To reduce yield variability and improve nitrogen use efficiency in winter wheat grown on clay loam fluvo-aquic soils in southeastern Henan—where uneven precipitation and excessive N inputs are common—we conducted a two-year split-plot field experiment. Main plots included two water regimes: rainfed (W0) and supplemental irrigation at both jointing and anthesis (W2; 75 mm per event). Subplots included five N rates: 0, 180, 240, 300, and 360 kg hm⁻² N (N0–N4). We assessed the combined effects of water and N on dry matter accumulation, N utilization, and grain yield. W2 significantly increased post-anthesis dry matter assimilation; compared with W0, dry matter accumulation from anthesis to filling increased by 32.2%, and total dry matter accumulation increased by 28.1%. In parallel, N uptake efficiency and the partial factor productivity of N increased by 26.7% and 25.5%, respectively. Water–N interactions synergistically regulated pre-anthesis N translocation and post-anthesis assimilate partitioning, thereby improving all three yield components. Under the optimal combination (W2N2), spike number, grains per spike, and thousand-grain weight reached 615.0×10^4 hm⁻², 43.9 grains spike⁻¹, and 45.6 g, respectively. Relative to the traditional high-N practice (W2N4), grains per spike and thousand-grain weight increased by 2.0% and 2.3%, respectively; relative to rainfed with reduced N (W0N2), spike number and grains per spike increased by 11.1% and 34.6%, respectively. These results indicate that W2 increased yield mainly by increasing spike number and grains per spike, whereas reducing N to N2 optimized grains per spike while maintaining a relatively high thousand-grain weight on the basis of stable spike number, forming a synergistic yield strategy characterized by “spike number as the foundation, grains per spike as the driver, and thousand-grain weight stabilization.” This strategy produced the highest yield (9331.8 kg hm⁻²) and increased the partial factor productivity of N and agronomic N use efficiency by 61.2% and 67.9%, respectively, compared with 360 kg hm⁻² N. Regarding soil environmental effects, supplemental irrigation altered the vertical distribution of nitrate-N, decreasing residual nitrate by 23.4% in the 0–40 cm layer but increasing it by 32.2% in the 40–100 cm layer, suggesting that irrigation optimization alone may promote downward N movement. However, combining W2 with N reduction to N2 reduced cumulative nitrate-N in the 0–100 cm profile by 26.9%, thereby mitigating leaching risk. Overall, applying 75 mm supplemental irrigation at jointing and anthesis together with 240 kg hm⁻² N provides an effective water–N management strategy that synchronously improves yield and N use efficiency for winter wheat production in the clay loam fluvo-aquic soil region of southeastern Henan.

Keywords: winter wheat; water-nitrogen synergy; supplemental irrigation at jointing and anthesis stages; dry matter partitioning; nitrogen reduction and efficiency enhancement; yield components

小麦作为我国重要的口粮作物,其产量稳定对保障粮食安全具有不可替代的战略意义^[1]。数据显示,小麦为我国居民提供了约 40%的口粮消费,但在城镇化加速与耕地资源约束的双重压力下,近十年来我国小麦单产年平均增长率仅维持在 0.57%的低位水平^[2]。这一问题在豫东南黏壤潮土核心产麦区尤为突出,该区域降水年际变化大,且各生育阶段分配不均,小麦水分敏感期(拔节—开花期)的降水量仅占全生育期的 20%左右,易发生轻度至中度干旱^[3]。同时,该区域长期采用“大水大肥”管理模式,导致氮肥过量施用^[4],已形成“产量波动-氮素低效-环境风险”的多重困境。研究表明,灌溉制度与水热资源不匹配加剧了硝态氮在深层土壤中的累积,导致地下水硝酸盐含量超标;该区域在高氮投入下氮肥农学效率仅为 34.7 kg kg⁻¹, 25%~40%的施氮量通过淋溶损失^[5-6];同时,过量灌溉导致深层土壤硝态氮累积量增加 35%~42%^[7],严重制约了农业可持续发展目标的实现。

近年来,研究揭示水氮耦合通过“干物质积累-氮素分配-产量形成”的三级协同机制影响作物生产力^[8]。在生理调控层面,拔节期+开花期补灌可延长冠层功能期 5~8 d,使花后光合产物贡献率提升 10%~15%^[9];减氮至 240 kg hm⁻²可通过优化分蘖成

穗率与籽粒库容,使氮素生理效率提高 23%^[10]。然而,现有研究多聚焦于砂壤土区,对保肥性强而导水性差的黏壤土区仍缺乏系统深入的认知^[11]。黏粒含量>30%的土壤结构虽能减少氮素淋失,但根系吸氮效率受土壤水分有效性的制约更强^[12];拔节至开花期的阶段性干旱可导致氮同化关键酶活性下降 40%~60%^[13-14],但精准补灌下氮素用量的适宜范围仍缺乏量化证据。此外,长期过量灌溉已引发该区域土壤水库功能退化^[15-17],因此,量化黏壤潮土区水氮互作的效应拐点,阐明其通过调控“穗数-粒数-粒重”实现增产增效的生理生态机制,对于该区域冬小麦绿色高产高效栽培模式的构建至关重要。

基于此,本研究通过 2 年田间裂区试验,以雨养(全生育期不灌水)处理为对照,设置拔节+开花期补灌(该灌溉模式经本团队多年大田试验验证,具有高产和水分高效利用的特点)处理,并结合氮肥梯度试验,探究水氮协同对黏壤潮土区冬小麦干物质积累、转运和分配、氮素利用及产量的调控效应,旨在筛选适宜于该地区高产和氮素高效利用的水氮组合,揭示梯度减氮(360、300、240、180、0 kg hm⁻² N)与水分调控在器官水平和生理过程中如何通过“穗数-粒数-粒重”的协同优化实现产量与氮素利用效率双赢的生理机制,为构建区域化水氮管理技术模式

提供理论依据, 推动黄淮南片麦区向绿色高产高效生产转型。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2022—2024 年连续 2 个冬小麦生长季在河南省周口市商水县亿港家庭农场(33°31'N, 114°42'E)进行。该基点属亚热带向暖温带过度的半湿润大陆性季风气候, 降水年际变化大, 生育期内分配不均, 小麦水分敏感期(拔节—开花期)降水量仅占全生育期的 20%左右(图 1), 属典型的补灌农业区,

常规灌溉模式为小麦越冬期、拔节期、开花期和灌浆期采用喷灌灌溉。试验区实行冬小麦-夏玉米周年轮作制, 前茬作物秸秆全量还田。供试土壤为黏壤潮土, 播前土壤理化性质见表 1。本研究中第 1 季和第 2 季小麦播前汛期降水量(6—9 月)与小麦全生育期(10 月—翌年 5 月)降水量之和基本相当, 分别为 838.1 mm 和 806.5 mm, 但降水时间分布上差别较大。第 1 季降水量集中在小麦生育期内, 占总降水量的 60%; 而第 2 季降水量则集中在播前汛期, 占当年降水量的 70.6%, 而生育期内降水量仅占 29.4% (图 1)。

表 1 播种前土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties before sowing

年份 Year	土层 SL (cm)	土壤颗粒构成 SPC (%)			含水量 MC (%)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	pH	有机质 SOC (g kg ⁻¹)	全氮 TN (g kg ⁻¹)	碱解氮 AN (mg kg ⁻¹)	速效钾 AK (mg kg ⁻¹)	有效磷 AP (mg kg ⁻¹)
		< 0.002	0.002–0.020	0.020–2.000								
		mm	mm	mm								
2022–	0–20	23.3	37.9	38.8	20.8	28.0	8.2	17.1	1.2	94.4	157.9	6.5
2023	20–40	26.4	33.1	40.5	22.4	21.1	8.2	8.0	0.8	74.4	112.9	3.5
2023–	0–20	23.6	38.4	38.0	22.8	23.9	8.1	17.8	1.2	96.5	211.9	6.1
2024	20–40	25.8	33.6	40.6	24.6	23.2	8.2	8.5	0.9	77.0	156.7	2.8

SL: soil layers; SPC: soil particle composition; MC: moisture content; SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen; AN: available nitrogen; AK: available potassium; AP: available phosphorus.

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计, 主区为水分处理, 设 2 个水平: W0 (雨养, 全生育期不灌水)和 W2 (拔节期+开花期各补灌 75 mm, 微喷灌)。副区为氮肥梯度, 设 5 个水平: 分别施 0 kg hm⁻² N (不施氮, N0)、180 kg hm⁻² N (减氮 50%, N1)、240 kg hm⁻² N (减氮 33.3%, N2)、300 kg hm⁻² N (减氮 16.7%, N3)、360 kg hm⁻² N (传统施氮量, N4)。每个处理重复 3 次, 共 30 个小区, 每小区面积 40 m²。供试品种为强筋冬小麦新麦 26, 基本苗为 375×10⁴株 hm⁻², 机械条播, 行距 20 cm。播种前墒情依赖自然降水, 未进行底墒灌溉(播前土壤含水量见表 1)。2022 年和 2023 年播种日期分别为 10 月 20 日和 10 月 26 日, 收获日期分别为翌年 6 月 6 日和 6 月 1 日。播前施入 P₂O₅ 120 kg hm⁻²、K₂O 90 kg hm⁻² 和 50%氮肥, 剩余 50%氮肥于拔节期追施。氮、磷和钾肥分别使用尿素(N, 46%)、重过磷酸钙(P₂O₅, 44%)和氯化钾(K₂O, 60%)。拔节期氮肥采用人工沟施, W2 处理追肥后 48 h 内进行喷灌。开花期补灌旨在满足生育后期水分需求, 并促进土壤残留氮素活化。其他田间管理措施与高

产大田一致。

1.3 测定指标方法

1.3.1 植株干物质积累与转运 两年度分别于越冬期(2022 年 12 月 23 日, 2024 年 1 月 4 日)、拔节期(2023 年 3 月 17 日, 2024 年 3 月 20 日)、开花期(2023 年 4 月 21 日, 2024 年 4 月 21 日)、灌浆期(2023 年 5 月 13 日, 2024 年 5 月 12 日)和成熟期(2023 年 6 月 6 日, 2024 年 6 月 1 日)在各处理小区内采用五点取样法, 避免边际效应(如田边、缺苗区域), 每个样点选取长势均匀、无病虫害且生育期一致的 4 株小麦植株, 每个小区共取样 20 株, 齐地面剪取完整地上部分。将植株样品按不同器官分离, 其中越冬期和拔节期分为叶和茎鞘; 开花期和灌浆期分为叶、茎鞘和穗; 成熟期分为叶、茎鞘、穗轴+颖壳和籽粒。分离后的样品放置于恒温烘箱内于 105℃下杀青 30 min, 后于 80℃下烘至恒重并称重, 相关指标计算公式如下:

干物质积累量(kg hm⁻²) = (各器官干重/取样株数) × 基本苗 / 1000 (1)

花前干物质转运量(kg hm⁻²) = 开花期干物质积累量 - 成熟期营养器官干物质积累量 (2)

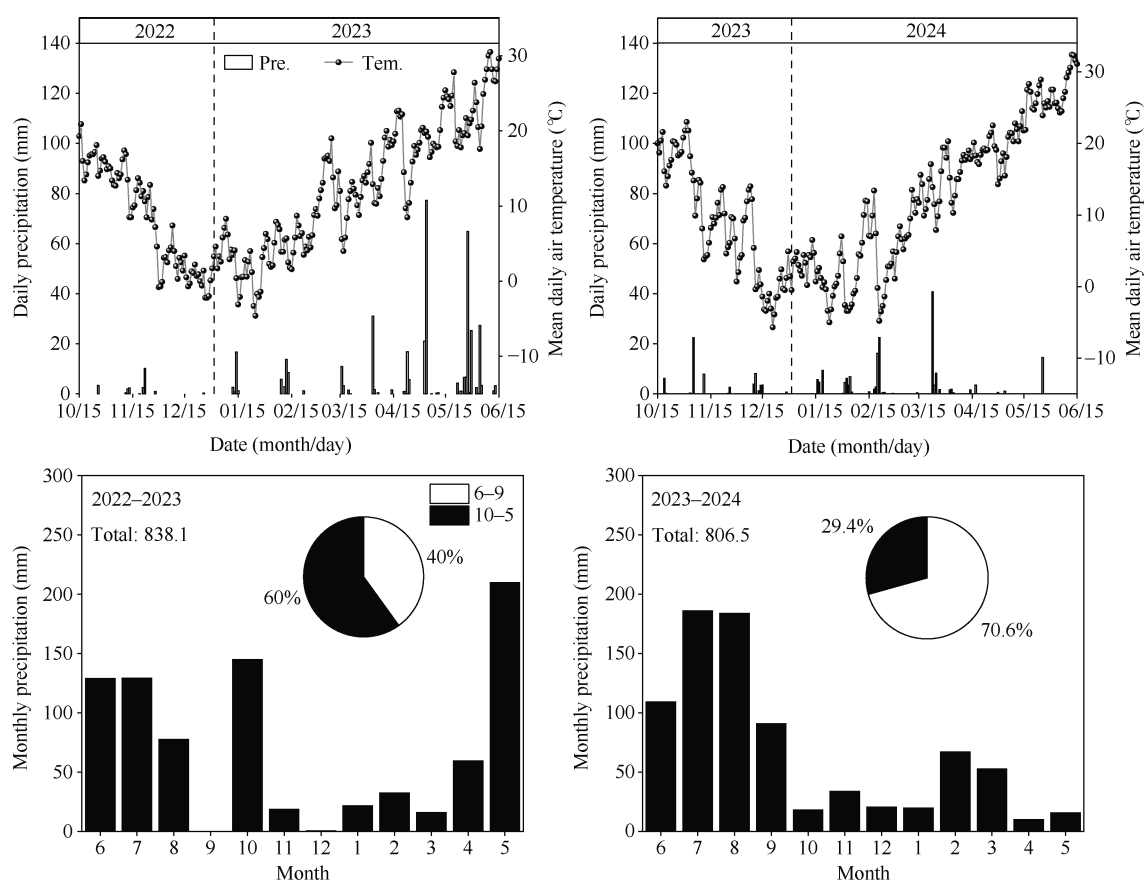


图 1 2022–2024 年冬小麦生育期日平均温度和降水量动态及播前汛期至成熟期月降水量

Fig. 1 Daily mean temperature and precipitation during the winter wheat growing seasons, and monthly precipitation from the pre-sowing flood season to maturity (2022–2024)

花前干物质转运率(%) = (花前干物质转运量/开花期积累量) × 100% (3)

花前干物质转运对籽粒的贡献率(%) = (花前干物质转运量/籽粒干重) × 100% (4)

花后干物质同化量(kg hm⁻²) = 籽粒干重 - 花前干物质转运量 (5)

花后干物质同化对籽粒的贡献率(%) = (花后干物质同化量/籽粒干重) × 100% (6)

1.3.2 植株氮素积累与利用 样本处理同 1.3.1, 粉碎后采用凯氏定氮法(GB 5009.5–2016)测定氮含量, 计算公式如下:

氮素积累量(kg hm⁻²) = 氮含量 × 干物质积累量 (7)

氮素分配比例(%) = (器官氮素积累量/植株总氮积累量) × 100% (8)

花前氮素转运量(kg hm⁻²) = 开花期营养器官氮积累量 - 成熟期营养器官氮积累量 (9)

花前氮素转运率(%) = (花前氮素转运量/开花期营养器官氮积累量) × 100% (10)

花后氮素同化量(kg hm⁻²) = 成熟期植株氮积累量 - 开花期植株氮积累量 (11)

花前氮素转运对籽粒的贡献率(%) = (花前氮素转运量/籽粒氮积累量) × 100% (12)

氮肥偏生产力(kg kg⁻¹) = 施氮区籽粒产量/施氮量 (13)

氮素吸收效率(kg kg⁻¹) = 施氮区成熟期地上部氮积累量/施氮量 (14)

氮素利用效率(kg kg⁻¹) = 籽粒产量/成熟期地上部氮积累量 (15)

氮肥农学利用率(kg kg⁻¹) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量 (16)

1.3.3 土壤硝态氮积累量 于成熟期采用土钻按每 20 cm 一层采集各处理 0~100 cm 土层的土壤样品。同时, 使用环刀法(环刀高 5 cm, 体积 100 cm³)按每 5 cm 一层采集 0~100 cm 原状土, 用于测定土壤容重。各土层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)的土壤容重以该层内 4 次测定结果的平

均值表示, 具体按公式(17)计算。采用紫外分光光度法(GB/T 32737-2016)测定土壤硝态氮含量, 并依据公式(18)计算土壤硝态氮累积量。

土壤容重(g cm^{-3}) = 环刀内干土质量(g) / 环刀体积(cm^3) (17)

土壤硝态氮累积量(kg hm^{-2}) = 硝态氮含量(mg kg^{-1}) $\times$ 土壤容重(g cm^{-3}) $\times$ 土层厚度(cm) / 10 (18)

1.3.4 产量及其构成因素 于成熟期调查 1 m 双行内穗数、穗粒数, 折算单位面积穗数和平均穗粒数。每小区收割 4 m^2 , 脱粒晒干后称重, 按 13% 含水量折算每公顷产量, 并测定千粒重。

1.4 数据处理与分析

数据经 Microsoft Excel 2019 整理后, 用 SPSS 26.0 进行方差分析(Duncan法, $\alpha = 0.05$), 并用 Origin Pro 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对冬小麦干物质积累、转运及分配的影响

2.1.1 干物质积累特征 由图 2 可知, 干物质积累随生育进程呈典型的单峰曲线变化, 峰值出现在拔节—开花期, 表明该阶段是冬小麦干物质积累的关键时期。灌水与施氮均显著影响了拔节至成熟期的干物质积累(图 2-b, d)。相较于 W0, W2 使拔节—开花期、开花—灌浆期和灌浆—成熟期阶段的干物质积累量分别平均提高 42.1%、32.2%和 69.4%, 最终总干物质质量平均增加 28.1%, 说明水分补充显著增强了中后期光合产物的形成与积累。施氮的促进效应更为显著, 与 N0 相比, 施氮处理(N1~N4)使播种—越冬期、越冬—拔节期、拔节—开花期、开花—灌浆期以及灌浆—成熟期阶段干物质积累量分

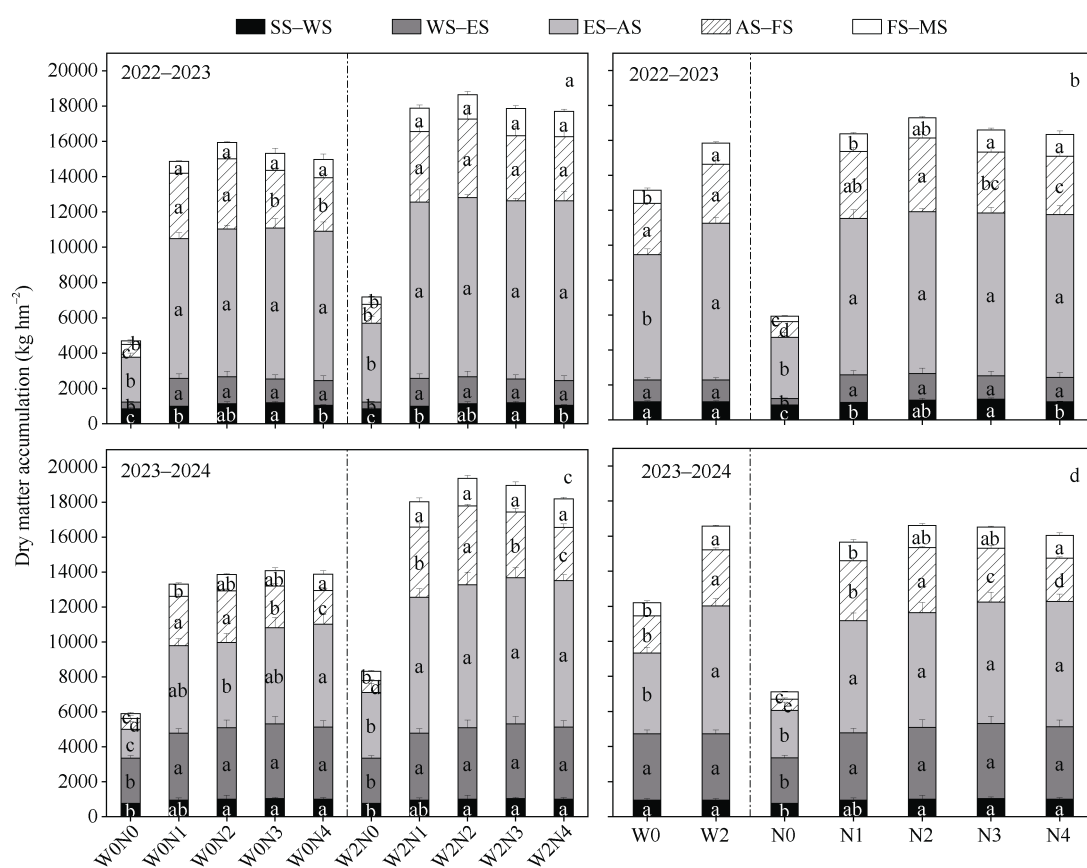


图 2 水氮互作对冬小麦各生育阶段干物质积累量的影响

Fig. 2 Effects of water-nitrogen interaction on dry matter accumulation at different growth stages of winter wheat

W0N0, W0N1, W0N2, W0N3, W0N4, W2N0, W2N1, W2N2, W2N3 和 W2N4 代表水氮互作处理; W0 和 W2 代表水分主处理, N0, N1, N2, N3 和 N4 代表施氮量副处理。生育阶段播种—越冬期、越冬—拔节期、拔节—开花期、开花—灌浆期和灌浆—成熟期分别用 SS-WS、WS-ES、ES-AS、AS-FS 和 FS-MS 表示。同一阶段不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

W0N0, W0N1, W0N2, W0N3, W0N4, W2N0, W2N1, W2N2, W2N3, and W2N4 denote water-N treatment combinations; W0 and W2 are the main-plot water treatments, and N0~N4 are the subplot N rates. Growth stages are abbreviated as SS-WS (sowing-wintering), WS-ES (wintering-jointing), ES-AS (jointing-anthesis), AS-FS (anthesis-filling), and FS-MS (filling-maturity). Within a given stage, different lower-case letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

别平均增加 30.0%、174.9%、156.2%、354.6%和 228.3%，最终总积累量平均提升 154.1%。水氮互作对干物质积累亦具有显著调控效应(图 2-a, c)。在 2 种水分处理下，施氮均较不施氮处理显著提升了各阶段干物质积累量，且其均随施氮量增加呈先升后降趋势，但处理间差异仅在开花—灌浆期达到显著水平。具体而言，开花—灌浆期干物质积累量在 W0 条件下表现为 $N2 \approx N1 > N3 \approx N4 > N0$ ；在 W2 条件下则为 $N2 > N1 \approx N3 > N4 > N0$ ，说明在水分优化基础上，适量施氮(N2)是实现干物质高效生产与积累量最大化的关键保障。

2.1.2 干物质转运特征 干物质转运特征显著受灌水、施氮及其互作影响，且 2 年间变化趋势基本一致(表 2)。从主效应分析，与 W0 相比，W2 提升了花前干物质转运量、花后干物质同化量及花后干物质同化对籽粒的贡献率，2 年平均增幅分别为 11.1%、40.6%和 10.2%；但降低了花前干物质转运率及花前干物质转运对籽粒的贡献率，平均降幅分别为 9.7%和 10.6%。与 N0 相比，施氮(N1~N4)显著增加了花前干物质转运量、花后干物质同化量及花

后干物质同化对籽粒的贡献率，平均增幅分别为 115.8%、308.7%和 41.5%，但使花前干物质转运对籽粒的贡献率平均降低了 26.6%。此外，水氮互作对氮素转运的影响显著。在不同施氮量下，花前干物质转运量、花前干物质转运率、花前干物质转运对籽粒的贡献率均表现为 $N1 \approx N2 < N3 \approx N4$ ，花后干物质同化量、花后干物质同化对籽粒的贡献率均表现为 $N1 \approx N2 > N3 \approx N4$ 。在不同水分条件下，减氮处理(N1、N2)对干物质转运的影响存在差异。在 W0 条件下，与高氮处理(N3、N4)相比，N1 和 N2 的花前干物质转运量、花前干物质转运率和花前干物质转运对籽粒的贡献率平均降低 14.7%、9.5%和 15.3%，而花后干物质同化量和花后干物质同化对籽粒的贡献率则平均增加 16.1%和 15.4%。在 W2 条件下，N1 和 N2 的花前干物质转运量、花前干物质转运率和花前干物质转运对籽粒的贡献率平均降幅分别为 7.1%、7.5%和 8.5%，花后干物质同化量和花后干物质同化对籽粒的贡献率亦略有下降，平均降幅分别为 8.2%和 6.0%，表明水分优化可在一定程度上缓解减氮对花后干物质积累的负效应。

表 2 水氮互作对冬小麦花前花后干物质转运特性的影响
Table 2 Effects of water-nitrogen interaction on pre- and post-anthesis dry matter translocation in winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	花前干物质转运量 DMR (kg hm ⁻²)	花前干物质转运率 DMRE (%)	花前干物质转运对 籽粒的贡献率 DMRCG (%)	花后干物质同化量 DMA (kg hm ⁻²)	花后干物质同化对 籽粒的贡献率 DMACG (%)
2022–2023	W0	3010.3±87.1 a	31.6±0.2 a	46.3±0.7 a	3707.2±97.9 b	53.7±0.7 a
	W2	3115.6±148.7 a	27.6±1.7 b	41.9±3.2 a	4586.1±448.0 a	58.1±3.2 a
	N0	1326.2±74.3 d	28.3±0.2 b	52.8±1.2 a	1204.7±44.6 c	47.2±1.2 c
	N1	3244.6±38.6 c	28.3±0.6 b	40.3±1.5 bc	4847.1±307.6 ab	59.7±1.5 ab
	N2	3386.5±247.2 bc	28.5±1.7 b	38.8±3.2 c	5372.1±424.9 a	61.2±3.2 a
	N3	3664.1±77.2 ab	31.1±0.9 a	43.8±2.0 b	4736.0±348.4 ab	56.2±2.0 ab
	N4	3693.4±215.7 a	31.6±2.3 a	44.9±3.6 b	4573.5±402.5 b	55.1±3.6 b
	W0N0	1122.8±84.6 c	29.8±0.5 b	54.9±4.2 a	924.0±86.0 c	45.1±4.2 d
	W0N1	3176.0±92.5 b	30.3±0.6 b	42.1±1.2 cd	4377.3±160.6 b	57.9±1.2 ab
	W0N2	3319.3±311.3 b	30.1±2.1 b	40.3±3.2 d	4914.9±199.2 a	59.7±3.2 a
	W0N3	3683.5±170.8 a	33.3±0.2 a	46.5±0.7 bc	4241.0±225.7 b	53.5±0.7 bc
	W0N4	3749.8±229.9 a	34.4±2.5 a	48.0±3.9 b	4079.0±409.6 b	52.0±3.9 c
	W2N0	1529.6±81.2 b	26.9±0.9 a	50.8±2.3 a	1485.3±174.6 b	49.2±2.3 b
	W2N1	3313.1±50.3 a	26.4±1.3 a	38.5±2.5 b	5316.9±482.1 a	61.5±2.5 a
	W2N2	3453.7±479.8 a	26.9±3.8 a	37.4±7.0 b	5829.4±904.6 a	62.6±7.0 a
	W2N3	3644.8±221.4 a	28.8±1.7 a	41.1±3.6 b	5231.0±474.0 a	58.9±3.6 a
	W2N4	3637.0±210.4 a	28.8±2.2 a	41.8±3.3 b	5068.1±395.6 a	58.2±3.3 a

(续表 2)

年份 Year	处理 Treatment	花前干物质转运量 DMR (kg hm ⁻²)	花前干物质转运率 DMRE (%)	花前干物质转运对 籽粒的贡献率 DMRCG (%)	花后干物质同化量 DMA (kg hm ⁻²)	花后干物质同化对 籽粒的贡献率 DMACG (%)
<i>F</i> -value						
2023–2024	W	1.6 ^{ns}	33.1 ^{***}	11.2 ^{**}	33.0 ^{***}	11.2 ^{**}
	N	111.3 ^{***}	4.4 [*]	13.9 ^{***}	95.6 ^{***}	13.9 ^{***}
	W×N	1.1 ^{ns}	0.5 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.3 ^{ns}	0.2 ^{ns}
	W0	2762.6±71.9 b	29.8±0.0 a	50.8±1.0 a	2885.9±94.2 b	49.2±1.0 b
	W2	3278.7±79.7 a	27.8±0.9 b	44.8±0.7 b	4545.8±153.4 a	55.2±0.7 a
	N0	1958.0±124.0 c	32.3±1.1 a	64.7±1.9 a	1062.7±82.0 d	35.3±1.9 d
	N1	2987.1±114.3 b	26.9±1.2 c	40.6±2.3 d	4490.1±312.0 b	59.4±2.3 a
	N2	3022.9±98.5 b	26.2±0.1 c	38.3±0.3 d	4979.2±99.4 a	61.7±0.3 a
	N3	3566.1±132.9 a	29.3±0.7 b	46.1±1.7 c	4276.5±117.9 b	53.9±1.7 b
	N4	3569.1±98.4 a	29.2±0.6 b	49.3±0.9 b	3770.7±150.8 c	50.7±0.9 c
	W0N0	1586.7±98.7 c	31.8±0.7 a	63.8±3.2 a	907.5±170.8 d	36.2±3.2 c
	W0N1	2800.8±89.4 b	28.6±1.0 bc	44.3±1.9 c	3518.6±187.3 b	55.7±1.9 a
	W0N2	2750.5±144.8 b	27.6±1.4 c	41.5±1.9 c	3872.9±126.2 a	58.5±1.9 a
	W0N3	3292.9±179.0 a	30.4±1.2 ab	50.2±2.9 b	3271.5±205.6 b	49.8±2.9 b
	W0N4	3381.8±198.9 a	30.7±1.1 ab	54.2±1.3 b	2858.7±25.4 c	45.8±1.3 b
	W2N0	2329.2±187.1 c	32.8±2.6 a	65.6±2.2 a	1217.8±25.0 d	34.4±2.2 c
	W2N1	3173.5±146.9 b	25.3±1.5 bc	36.8±2.8 c	5461.5±437.6 b	63.2±2.8 a
	W2N2	3295.2±196.6 b	24.8±1.2 c	35.1±1.7 c	6085.4±225.7 a	64.9±1.7 a
	W2N3	3839.3±181.8 a	28.1±0.7 b	42.1±1.4 b	5281.5±58.3 b	57.9±1.4 b
	W2N4	3756.4±160.6 a	27.8±0.8 b	44.5±2.4 b	4682.6±277.0 c	55.5±2.4 b
<i>F</i> -value						
	W	75.6 ^{***}	17.8 ^{***}	52.3 ^{***}	463.0 ^{***}	52.3 ^{***}
	N	98.1 ^{***}	19.2 ^{***}	127.5 ^{***}	321.0 ^{***}	127.5 ^{***}
	W×N	1.3 ^{ns}	2.6 ^{ns}	5.8 ^{**}	19.8 ^{***}	5.8 ^{**}

处理同图 2。同列数据后的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。ns 表示无显著差异; *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。W 代表水分主处理效应, N 代表施氮量副处理效应, W×N 代表水分主处理与施氮量副处理之间的交互作用效应。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. DMR: dry matter remobilization at pre-anthesis; DMRE: dry matter remobilization at pre-anthesis; DMRCG: contribution of dry matter remobilization to grain at pre-anthesis; DMA: dry matter accumulation at post-anthesis; DMACG: contribution of dry matter accumulation to grain at post-anthesis. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns: no significant difference; *, **, and *** indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively. W: main effect of water; N: main effect of N rate; W×N: water-by-N interaction.

2.1.3 各器官干物质分配

灌水与施氮及其交互均对冬小麦开花期和成熟期各器官的干物质分配影响显著, 2 年试验结果趋势一致(图 3 和图 4)。灌水显著促进各器官干物质积累。与 W0 相比, W2 使开花期叶、茎和穗的干物质积累量分别平均增加 24.1%、27.8%和 13.6%, 总积累量提高 24.1%; 成熟期叶、

茎、穗轴+颖壳和籽粒的积累量分别平均增加 35.0%、31.4%、21.9%和 26.6%, 最终总积累量平均提升 28.1%。结果表明, 水分优化有助于增强光合产物的形成与滞留能力, 特别是促进了花后同化物向籽粒的高效转运。此外, 施氮也显著提高了各器官干物质积累量。与 N0 相比, 施氮处理(N1~N4)在开

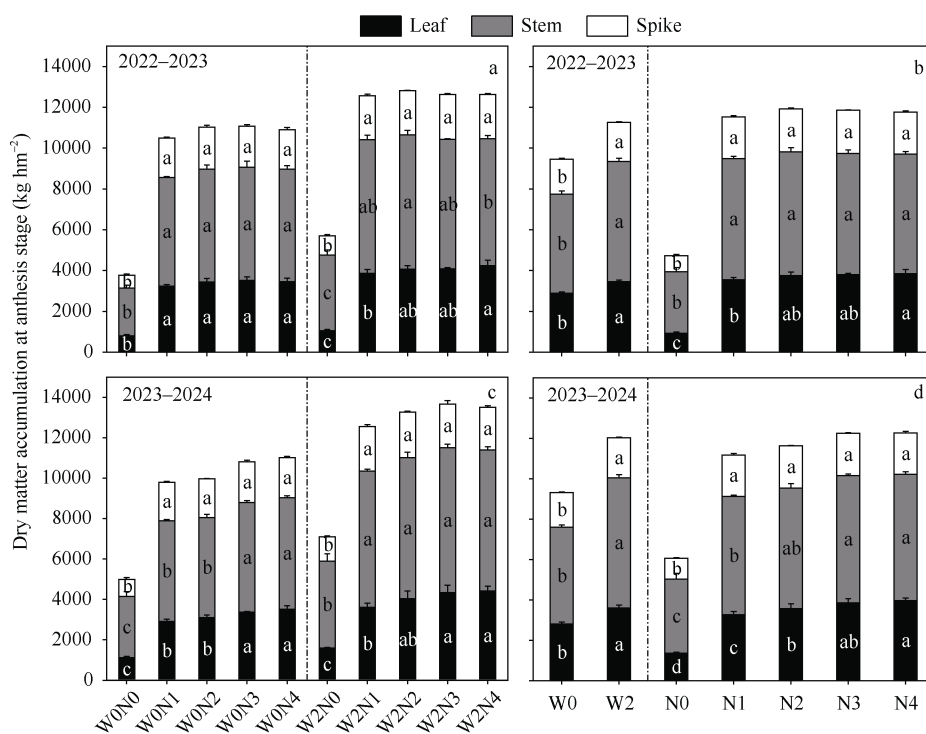


图 3 水氮互作对冬小麦开花期各器官干物质分配量的影响

Fig. 3 Effects of water-nitrogen interaction on dry matter allocation among organs at anthesis in winter wheat

处理同图 2。不同小写字母表示同一器官干物质分配量在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. For a given organ, different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

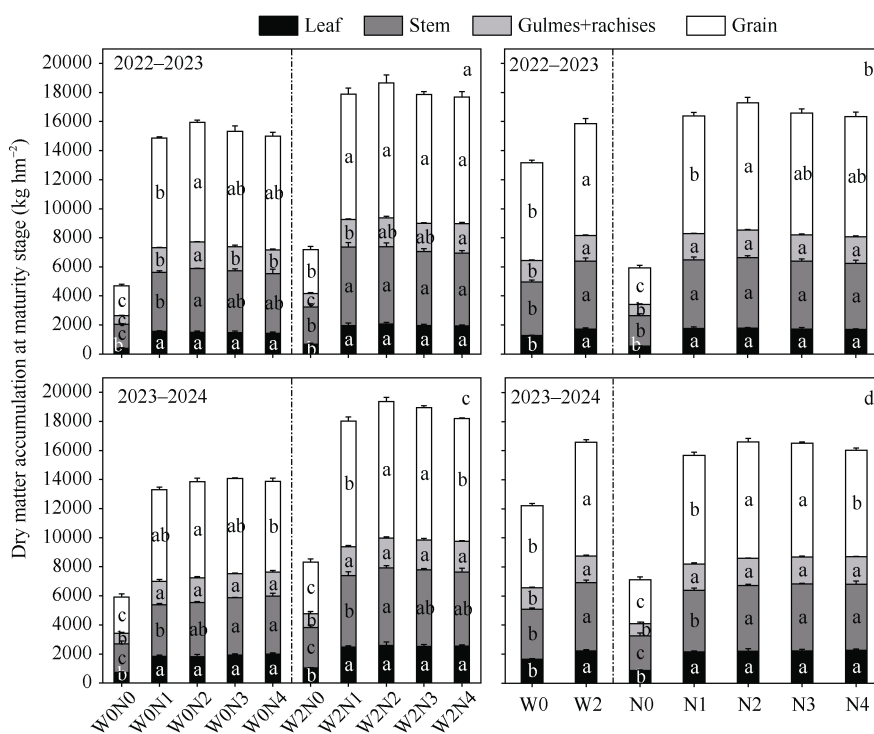


图 4 水氮互作对冬小麦成熟期各器官干物质分配量的影响

Fig. 4 Effects of water-nitrogen interaction on dry matter allocation among organs at maturity in winter wheat

处理同图 2。不同小写字母表示同一器官干物质分配量在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. For a given organ, different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

花期使叶、茎和穗的积累量分别平均增加 236.7%、81.8%和 132.0%，总积累量平均提高 122.0%；成熟期叶、茎、穗轴+颖壳和籽粒的积累量分别平均增加 186.5%、106.3%、129.6%和 192.4%，总积累量平均增加 154.1%。说明氮素供应对器官建成及产量形成具有关键作用，尤其有利于叶片扩展和穗部发育。更重要的是，水氮互作进一步调控了干物质分配格局。在 W0 条件下，开花期叶和茎的积累量均表现为 $N1 \approx N2 < N3 \approx N4$ ；而成熟期 N2 处理的籽粒积累量最高，较 N1、N3 和 N4 分别平均提高 6.9%、2.4%和 5.7%，表明适度减氮在 W0 条件下可优化同化物向籽粒分配。在 W2 条件下，开花期以 N2 处理的叶、茎积累量最高，但与 N3、N4 无显著差异；成熟期各器官积累量随施氮量增加呈先增后降趋势，均在 N2 处理下达峰值，反映水分充足时作物对氮肥响应趋于平缓，适量施氮即可实现器官协调生长。

2.2 水氮互作对冬小麦氮素积累与利用的影响

2.2.1 植株氮素积累与分配 灌水、施氮及其互

作对冬小麦开花期和成熟期各器官的氮素分配均具有显著影响(图 5 和图 6)。从灌水效应来看，与 W0 相比，W2 显著提高了各器官氮素积累量。开花期叶、茎和穗的氮素积累量分别平均增加 45.9%、32.8%和 19.0%，植株总氮积累量平均提高 35.4%；成熟期叶、茎、穗轴+颖壳和籽粒的氮素积累量进一步增加，平均增幅分别为 33.8%、42.4%、32.6%和 25.5%，最终总氮积累量平均增加 27.5%，表明水分优化有助于促进氮素吸收与积累。此外，施氮对氮素积累的影响显著。相较于 N0，施氮处理(N1~N4)在开花期使叶、茎和穗的氮素积累量分别平均增加 605.1%、413.0%和 220.6%，植株总氮积累量平均提升 418.7%；成熟期各器官氮素积累量亦显著增加，其中叶、茎、穗轴+颖壳和籽粒分别平均增加 408.4%、470.5%、158.9%和 356.8%，最终总氮积累量平均增加 352.9%，说明氮素供应是植株氮素积累的主要驱动因素。另外，水氮互作对氮素分配具有协同调控效应。在不同水分条件下，氮素在器官间的分配量

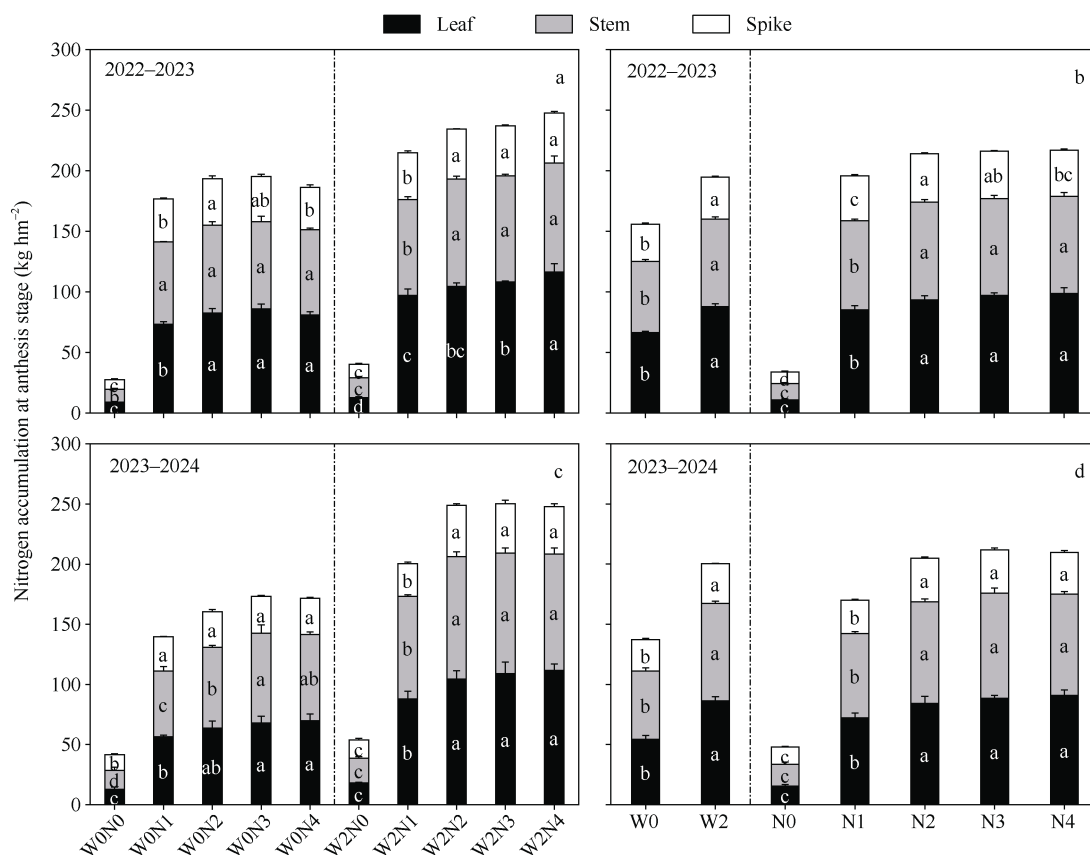


图5 水氮互作对冬小麦开花期各器官氮素积累量的影响

Fig. 5 Effects of water-nitrogen interaction on nitrogen accumulation in different organs of winter wheat at anthesis

处理同图 2。不同小写字母表示同一器官氮素分配量在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. For a given organ, different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

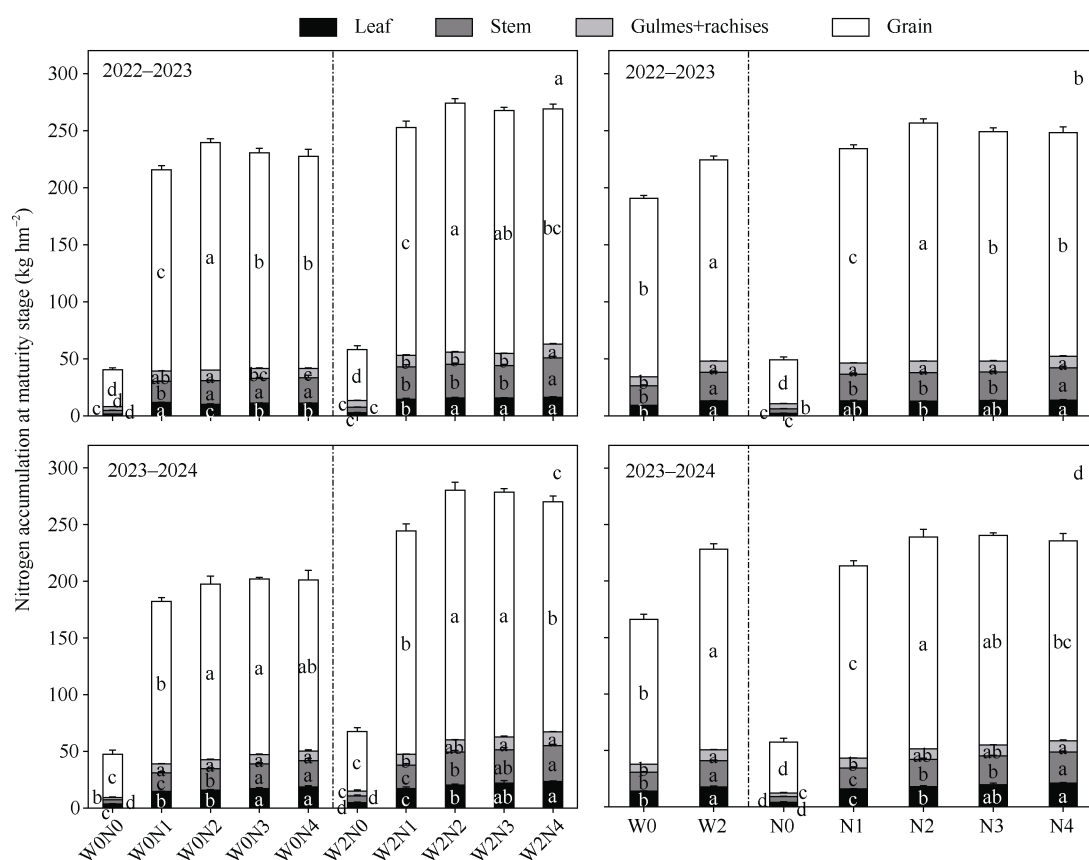


图 6 水氮互作对冬小麦成熟期各器官氮素积累量的影响

Fig. 6 Effects of water-nitrogen interaction on nitrogen accumulation in different organs of winter wheat at maturity

处理同图 2。不同小写字母表示同一器官氮素分配量在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. For a given organ, different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

随施氮量增加均呈现先增后减趋势。开花期叶、茎和穗的氮素积累量在 N2 处理(W0N2 和 W2N2)下达到最高, 但 N2、N3 和 N4 处理间无显著差异; 而成熟期营养器官(叶、茎、穗轴+颖壳)的氮素积累量以 N4 处理最高, 籽粒中氮素积累量则在 N2 处理下达到峰值。具体表现为: W0N2 处理的籽粒氮素积累量较 W0N0、W0N1、W0N3 和 W0N4 分别平均增加 413.0%、10.7%、2.8%和 5.0%; W2N2 处理则较 W2N0、W2N1、W2N3 和 W2N4 分别平均增加 353.8%、10.5%、2.2%和 7.1%。综上, 适量施氮(N2)配合合理水分管理可优化氮素向籽粒的分配, 有助于提高氮素利用效率。

2.2.2 氮素转运特征 灌水、施氮及其互作对氮素转运过程的影响显著, 但对不同转运组分的调控效应存在差异(表 3)。在灌水效应方面, 与 W0 相比, W2 处理使花前氮素转运量和花前氮素转运对籽粒的贡献率分别平均提升 35.5%和 5.8%, 但花前氮素转运率、花后氮素同化量及花后氮素

同化对籽粒的贡献率则分别平均降低 1.0%、9.2%和 19.2%。这表明, 灌水虽然促进了花前氮素向籽粒的转运, 却在一定程度上抑制了花后氮素的同化与贡献能力。此外, 施氮对氮素转运的影响显著。与 N0 相比, N1~N4 处理使花前氮素转运量、花前氮素转运率、花前氮素转运对籽粒的贡献率及花后氮素同化量分别平均提升 456.3%、5.4%、18.5%和 190.5%, 而花后氮素同化对籽粒的贡献率平均降低 29.8%。这说明施氮在增强植株氮素吸收与转运能力的同时, 促使氮素贡献重心向花前阶段转移。此外, 水氮互作对氮素转运表现出协同调控效应。在不同水分条件下, 花前氮素转运相关指标(花前氮素转运量、花前氮素转运率、花前氮素转运对籽粒的贡献率)及花后氮素同化量均随施氮量增加呈先升后降趋势, 而花后氮素同化对籽粒的贡献率呈下降趋势。具体表现为: 两种水分条件下花前氮素转运指标(花前氮素转运量、花前氮素转运率、花前氮素转运对籽粒的贡献率)均在 N2

和 N3 处理达到峰值; 花后氮素同化量以 W0N2 和 W2N2 处理最大, 而花后氮素同化对籽粒的贡献率则以不施氮处理(W0N0 和 W2N0)最高。综上所述, 水氮协同管理可有效优化氮素转运路径, 适量施氮配合合理灌水有助于实现花前与花后氮素转运的均衡分配。

表 3 水氮互动对冬小麦花前与花后氮素转运特征的影响
Table 3 Effects of water-nitrogen interaction on nitrogen translocation before and after anthesis in winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	花前氮素转运量 NTR (kg hm ⁻²)	花前氮素转运率 NTR-E (%)	花前氮素转运对籽粒的贡献率 NTR-C (%)	花后氮素同化量 NAA (kg hm ⁻²)	花后氮素同化对籽粒的贡献率 Post-NCR (%)
2022–2023	W0	121.7±3.0 b	76.8±0.2 a	74.9±1.0 b	34.8±0.6 a	25.1±1.0 a
	W2	146.8±1.8 a	73.9±0.4 b	79.7±0.7 a	29.4±2.0 b	20.3±0.7 b
	N0	23.2±1.7 c	68.6±0.8 c	60.2±0.9 c	15.3±0.8 c	39.8±0.9 a
	N1	149.6±3.4 b	76.5±0.2 b	79.5±1.2 b	38.3±2.4 ab	20.5±1.2 b
	N2	165.9±3.9 a	77.7±0.4 a	79.4±2.8 b	42.8±6.6 a	20.6±2.8 b
	N3	168.2±3.4 a	77.8±0.2 a	83.6±0.4 a	32.7±0.3 b	16.4±0.4 c
	N4	164.6±1.7 a	76.1±0.6 b	83.7±1.7 a	31.4±4.1 b	16.3±1.7 c
	W0N0	19.5±1.7 c	70.6±1.5 b	60.4±2.6 b	12.8±0.6 c	39.6±2.6 a
	W0N1	137.4±1.5 b	77.7±0.1 a	78.0±1.8 a	38.8±3.9 ab	22.0±1.8 b
	W0N2	153.3±4.3 a	79.2±0.5 a	76.9±2.4 a	46.0±5.2 a	23.1±2.4 b
	W0N3	153.9±6.9 a	78.7±0.2 a	81.4±2.0 a	35.2±3.2 b	18.6±2.0 b
	W0N4	144.5±2.3 b	77.6±0.9 a	77.8±2.6 a	41.3±6.2 ab	22.2±2.6 b
	W2N0	26.8±1.6 c	66.7±0.4 d	60.0±0.8 d	17.9±1.7 c	40.0±0.8 a
	W2N1	161.7±5.3 b	75.3±0.4 bc	81.1±0.7 c	37.7±1.3 ab	18.9±0.7 b
	W2N2	178.4±4.6 a	76.1±0.7 ab	81.9±3.5 c	39.6±8.5 a	18.1±3.5 b
	W2N3	182.5±2.2 a	76.9±0.5 a	85.8±1.2 b	30.3±2.9 b	14.2±1.2 c
	W2N4	184.6±1.7 a	74.6±0.5 c	89.6±1.0 a	21.5±2.4 c	10.4±1.0 d
	F-value					
	W	343.5***	132.9***	40.1***	12.2**	40.1***
	N	1709.0***	188.1***	135.2***	35.9***	135.2***
	W×N	15.2***	1.9 ^{ns}	7.0**	7.0**	7.0**
2023–2024	W0	99.6±5.9 b	73.2±1.2 a	78.6±2.2 b	28.8±2.1 a	21.4±2.2 a
	W2	149.8±3.7 a	74.4±0.3 a	82.7±0.7 a	27.9±1.0 a	17.3±0.7b
	N0	35.5±1.7 c	74.7±1.0 a	79.7±2.3 b	9.6±1.9 d	20.3±2.3 b
	N1	126.8±4.8 b	74.1±0.8 a	74.0±1.4 c	43.3±1.8 a	26.0±1.4 a
	N2	153.3±6.7 a	74.6±0.8 a	80.9±1.1 b	34.3±1.5 b	19.1±1.1 b
	N3	156.7±5.3 a	73.8±0.5 a	84.1±1.6 a	28.7±2.3 c	15.9±1.6 c
	N4	151.0±5.2 a	71.7±1.3 b	84.7±0.8 a	26.0±0.3 c	15.3±0.8 c
	W0N0	32.2±3.1 c	77.3±0.0 b	84.9±1.8 a	5.7±0.4 c	15.1±1.8 c
	W0N1	100.7±5.1 b	72.0±1.2 a	70.3±2.7 c	42.5±3.3 a	29.7±2.7 a
	W0N2	117.8±5.5 a	73.4±1.1 a	76.0±0.3 b	37.3±1.3 a	24.0±0.3 b
	W0N3	126.0±5.8 a	72.7±0.7 a	81.4±3.2 a	28.8±4.8 b	18.6±3.2 c
	W0N4	121.4±11.0 a	70.6±3.6 a	80.3±3.6 ab	29.6±4.2 b	19.7±3.6 bc
	W2N0	38.8±1.1 c	72.1±1.9 b	74.4±5.5 b	13.5±3.9 d	25.6±5.5 a
	W2N1	152.9±4.5 b	76.3±0.6 a	77.6±1.3 b	44.1±3.8 a	22.4±1.3 a
	W2N2	188.9±8.0 a	75.8±0.4 a	85.8±1.9 a	31.2±3.5 b	14.2±1.9 b
	W2N3	187.5±5.1 a	74.9±0.5 a	86.8±1.5 a	28.5±3.7 bc	13.2±1.5 b
	W2N4	180.6±3.0 a	72.9±1.1 b	89.0±2.0 a	22.3±4.3 c	11.0±2.0 b

(续表 3)

年份 Year	处理 Treatment	花前氮素转运量 NTR (kg hm ⁻²)	花前氮素转运率 NTR-E (%)	花前氮素转运对籽 粒的贡献率 NTR-C (%)	花后氮素同化量 NAA (kg hm ⁻²)	花后氮素同化对籽 粒的贡献率 Post-NCR (%)
F-value						
	W	549.9***	4.9*	17.0**	0.4 ^{ns}	17.0**
	N	459.2***	3.9*	14.4***	72.2***	14.4***
	W×N	27.9***	9.0***	13.7***	4.4*	13.7***

处理同图 2。同列数据后的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。ns 表示无显著差异; *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。W 代表水分主处理效应, N 代表施氮量副处理效应, W×N 代表水分主处理与施氮量副处理之间的交互作用效应。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. NTR: nitrogen translocation before anthesis; NTR-E: nitrogen transport efficiency before anthesis; NTR-C: contribution rate of pre-anthesis nitrogen translocation to grain; NAA: nitrogen accumulation after anthesis; Post-NCR: contribution rate of post-anthesis nitrogen assimilation to grain. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns: no significant difference; *, **, and *** indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively. W: main effect of water; N: main effect of N rate; W×N: water-by-N interaction.

2.2.3 成熟期土壤硝态氮分布 灌水与施氮及其交互作用对土壤硝态氮的空间分布影响显著, 2 年间变化趋势基本一致, 但累积峰值的具体位置和迁移深度存在年际差异(图 7)。灌水对硝态氮的垂直分布影响显著。在 2022—2023 年, W0 条件下硝态氮主要富集于 20~40 cm 浅层土壤; 而 W2 对 0~60 cm 土层硝态氮产生稀释效应, 与 W0 相比, 其残留量平均降低 34.2%, 同时促进了硝态氮向 60~100 cm 土层迁移, 残留量平均增加 12.7%, 整体上使 0~100 cm 土层硝态氮残留量平均减少 17.6%。2023—2024 年进一步显示, W2 处理使 0~40 cm 浅层硝态氮残留量平均降低 23.4%, 而 40~100 cm 深层残留量平均增加 32.2%。由此可见, 灌水通过促进硝态氮向下迁移, 有效调节其在土壤剖面中的分布, 减少浅层累积, 但同时也增加了深层氮素的淋溶风险。此外, 施氮显著增加了土壤硝态氮残留量, 并呈现剂量效应。在 2 年试验中, 施氮处理较 N0 显著提高了各土层硝态氮残留量, 且随施氮量增加效应更为突出, 在 N4 处理达到峰值。2022—2023 年, W0 条件下, N0、N1、N2、N3 处理较 N4 的 0~100 cm 硝态氮残留量分别降低 60.7%、36.8%、26.9%和 16.9%; W2 条件下, N0、N1、N2、N3 较 N4 的 0~100 cm 硝态氮残留量则分别降低 55.4%、31.4%、19.8%和 14.3%。说明施氮是土壤硝态氮残留的主要来源, 过量施氮将显著增加氮素在土壤中的累积量。此外, 水氮互作对硝态氮分布的影响显著, 并且在不同年份间表现一致。2023—2024 年, W0 条件下, N0、N1、N2、N3 处理

较 N4 对 0~100 cm 硝态氮累积的降幅为 52.2%、44.2%、22.5%和 5.6%; W2 条件下则为 62.5%、51.4%、15.7%和 4.9%。这表明水氮协同调控作用具有较强的重现性, 其具体效应可能受年度气候条件与作物吸收等因素的影响。

2.2.4 氮素利用效率 在调控土壤氮素残留的同时, 水氮互作也显著影响了植株的氮素利用效率(表 4)。灌水、施氮及其互作均显著影响氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮素利用效率及氮肥农学效率, 且 2 年变化趋势基本一致。灌水提高了氮素利用效率。与 W0 相比, W2 处理使氮肥偏生产力、氮素吸收效率和氮肥农学效率分别平均提高 25.5%、26.7%和 18.2%, 说明水分优化有助于促进氮肥的高效吸收与利用, 从而提高氮素综合利用效率。此外, 施氮量对各氮效率指标均呈现报酬递减效应。随着施氮量增加, 氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥农学效率均逐渐下降, 以 N4 处理为最低。与 N4 相比, N1、N2 和 N3 各氮素利用效率指标分别平均提高 99.8%、61.2%和 25.1% (氮肥偏生产力), 84.8%、53.6%和 21.4% (氮素吸收效率), 8.0%、4.9%和 3.0% (氮素利用效率), 100.1%、67.9%和 28.4% (氮肥农学效率)。表明适量减氮可有效缓解氮肥过量施用带来的氮肥利用效率下降问题, 实现氮素资源的高效配置。此外, 水氮互作对氮素利用效率具有协同增强作用。在 W0 和 W2 条件下, 各氮素利用效率指标均随施氮量增加而显著降低, 但在同一减氮水平下, W2 处理对氮肥利用效率提升效果均

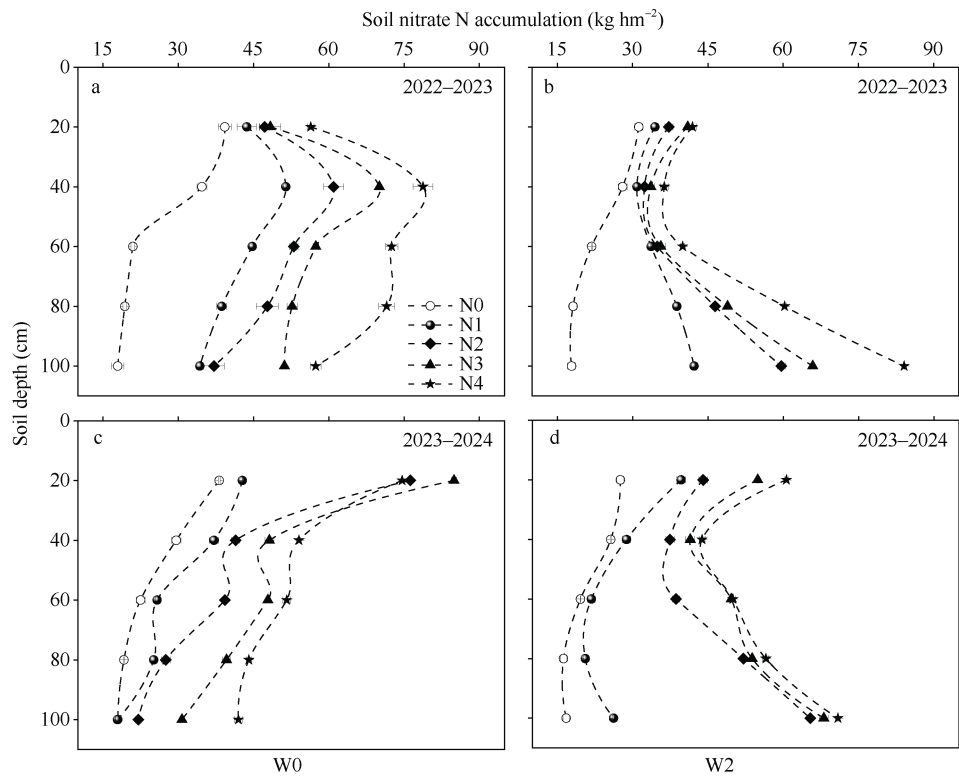


图 7 冬小麦两种水分条件下不同施氮量处理成熟期土壤硝态氮累积量分布特征
Fig. 7 Soil nitrate-N accumulation by depth at maturity under different N rates and water regimes
处理同图 2。Treatments are the same as those given in Fig. 2.

表 4 水氮互动对冬小麦氮肥利用效率的影响
Table 4 Effects of water-nitrogen interaction on nitrogen use efficiency in winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	氮肥偏生产力 NPFP (kg kg ⁻¹)	氮素吸收效率 NUPE (kg kg ⁻¹)	氮素利用效率 NUTE (kg kg ⁻¹)	氮肥农学效率 NAE (kg kg ⁻¹)
2022-2023	W0	31.1±0.9 b	0.9±0.0 b	34.5±0.2 a	23.0±0.8 a
	W2	35.1±1.4 a	1.0±0.0 a	33.4±0.6 b	23.2±0.5 a
	N1	45.0±1.7 a	1.3±0.0 a	34.6±0.5 a	30.9±1.0 a
	N2	36.5±1.2 b	1.1±0.0 b	34.1±0.6 ab	25.9±0.8 b
	N3	28.0±1.1 c	0.8±0.0 c	33.8±0.8 ab	19.6±0.7 c
	N4	23.0±0.6 d	0.7±0.0 d	33.4±0.2 b	15.9±0.2 d
	W0N1	42.0±1.0 a	1.2±0.0 a	35.0±0.4 a	30.6±1.0 a
	W0N2	34.3±0.5 b	1.0±0.0 b	34.4±0.0 a	25.8±0.5 b
	W0N3	26.4±1.3 c	0.8±0.0 c	34.4±0.9 a	19.6±1.3 c
	W0N4	21.7±0.6 d	0.6±0.0 d	34.4±0.3 a	16.1±0.6 d
	W2N1	47.9±2.4 a	1.4±0.0 a	34.1±0.6 a	31.2±1.1 a
	W2N2	38.7±2.0 b	1.1±0.0 b	33.9±1.2 a	26.1±1.1 b
	W2N3	29.6±1.0 c	0.9±0.0 c	33.2±0.7 ab	19.5±0.3 c
	W2N4	24.2±0.5 d	0.7±0.0 d	32.4±0.0 b	15.8±0.2 d
	F-value				
2023-2024	W	54.3***	72.2***	19.8***	0.2 ^{ns}
	N	317.7***	270.9***	4.2*	376.4***
	W×N	1.9 ^{ns}	3.6*	1.6 ^{ns}	0.3 ^{ns}

(续表 4)

年份 Year	处理 Treatment	氮肥偏生产力 NPFP (kg kg ⁻¹)	氮素吸收效率 NUPE (kg kg ⁻¹)	氮素利用效率 NUTE (kg kg ⁻¹)	氮肥农学效率 NAE (kg kg ⁻¹)
2023–2024	W0	25.5±0.5 b	0.8±0.0 b	32.9±0.1 a	15.6±0.6 b
	W2	35.2±1.0 a	1.1±0.0 a	33.2±0.1 a	21.2±0.4 a
	N1	41.5±1.4 a	1.2±0.0 a	35.0±0.5 a	24.8±0.4 a
	N2	33.3±0.8 b	1.0±0.0 b	33.5±0.3 b	20.8±0.1 b
	N3	26.1±0.3 c	0.8±0.0 c	32.6±0.2 c	16.1±0.4 c
	N4	20.4±0.5 d	0.7±0.0 d	31.1±0.2 d	12.0±0.1 d
	W0N1	35.1±0.9 a	1.0±0.0 a	34.7±0.6 a	21.3±0.9 a
	W0N2	27.6±0.5 b	0.8±0.0 b	33.5±0.7 b	17.2±0.7 b
	W0N3	21.9±0.1 c	0.7±0.0 c	32.5±0.2 c	13.6±0.8 c
	W0N4	17.3±0.6 d	0.6±0.0 d	31.0±0.4 d	10.4±0.3 d
	W2N1	48.0±1.9 a	1.4±0.0 a	35.3±0.5 a	28.3±1.0 a
	W2N2	39.1±1.1 b	1.2±0.0 b	33.5±0.2 b	24.3±0.5 b
	W2N3	30.4±0.4 c	0.9±0.0 c	32.7±0.3 c	18.6±0.2 c
	W2N4	23.4±0.5 d	0.8±0.0 d	31.2±0.3 d	13.6±0.1 d
	<i>F</i> -value				
	W	699.2***	272.3***	2.2 ^{ns}	438.0***
	N	618.5***	170.9***	85.5***	434.6***
	W×N	16.9***	6.9**	0.8 ^{ns}	12.0***

处理同图 2。同列数据后的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ns 表示无显著差异; *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。W 代表水分主处理效应, N 代表施氮量副处理效应, W×N 代表水分主处理与施氮量副处理之间的交互作用效应。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. NPFP: nitrogen partial factor productivity; NUPE: nitrogen uptake efficiency; NUTE: nitrogen utilization efficiency; NAE: nitrogen agronomic efficiency. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns: no significant difference; *, **, and *** indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively. W: main effect of water; N: main effect of N rate; W×N: water-by-N interaction.

优于 W0。具体表现为, 与 W0 相比, W2 条件下各减氮处理(N1、N2、N3)相对于 N4 处理的氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥农学效率分别平均增加 3.6、0.4、1.9 和 6.2 个百分点。而水氮优化处理 W2N2 的氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥农学效率较 W2N4 分别平均提高 63.5%、53.6%、6.0%和 71.9%。由此可见, 灌水与减氮措施相结合, 能够进一步优化氮素利用效率, 实现氮资源高效利用。

2.3 水氮互作对冬小麦产量及其构成因素的影响

灌水与施氮及其互作对冬小麦产量及其构成因素具有显著的差异化和协同调控效应, 且该效应应在不同年份间表现一致(表 5)。与 W0 处理相比, W2 使单位面积穗数、穗粒数和产量分别平均提高 21.9%、13.4%和 26.6%。这说明水分供应是保障有效分蘖成穗和促进小花发育的关键, 补灌处理主要通过增加

单位面积穗数和穗粒数为产量提升奠定结构基础。施氮处理同样显著影响产量及其构成因素, 并表现出显著的阈值效应。与 N0 处理相比, 施氮(N1~N4)使单位面积穗数、穗粒数和产量分别平均提高 75.3%、59.6%和 192.4%。随着施氮量增加, 各指标均呈先增后降的趋势, 以 N2 或 N3 处理最优, 但处理间差异不显著, 其中, N2 和 N3 较 N1 平均增产 4.3%~7.7%; 与高氮处理 N4 相比, N2 的千粒重平均提高 4.0%, 产量平均增加 7.4%。这表明适量施氮可使穗数、穗粒数和千粒重协同维持较高水平; 而过量施氮虽能维持或略增穗数, 却导致穗粒数增长停滞甚至下降, 反映出库源关系失衡。水氮互作对产量及其构成因素的调控效应进一步表明, 在 W0 条件下, N2 处理的单位面积穗数较 N0、N1、N3 和 N4 分别增加 96.1%、8.5%、-2.4%和-1.7%, 穗粒数分别增加 70.5%、8.5%、1.7%和 2.1%, 千粒重分别增加 -8.0%、-1.8%、2.7%和 4.2%, 产量分别提高

233.9%、6.9%、2.4%和 5.7%。在 W2 条件下, N2 处理的单位面积穗数较 N0、N1、N3 和 N4 分别增加 65.9%、5.7%、0.0%和 1.7%, 穗粒数分别增加 58.9%、8.5%、2.0%和 2.2%, 千粒重分别增加-6.9%、-1.1%、1.5%和 3.7%, 产量分别提高 86.2%、8.1%、3.7%和 8.9%。因此, 在补灌基础上将施氮量调整至 N2 水平 (W2N2), 可在获得最高单位面积穗数(2 年平均达 $615.0\times10^4\text{ hm}^{-2}$)和穗粒数(2 年平均达 43.9 粒 穗^{-1})的同时, 使千粒重稳定在较高水平(2 年平均达 45.6 g), 从而避免单一措施可能带来的短板效应。这种“水促穗数、氮调粒数、协同稳粒重”的互作模式, 为实现冬小麦产量提升提供了重要的结构基础。

表 5 水氮互作对冬小麦产量及其构成因素的影响
Table 5 Effects of water-nitrogen interaction on grain yield and yield components of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spikes ($\times10^4\text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm^{-2})
2022–2023	W0	449.6±2.3 b	39.3±0.2 b	45.8±0.3 a	6717.5±45.5 b
	W2	523.8±17.2 a	41.5±0.2 a	45.8±0.0 a	7701.8±114.6 a
	N0	316.5±10.1 c	24.9±1.0 c	49.3±0.4 a	2530.9±113.0 c
	N1	491.3±19.2 b	43.3±0.3 b	46.1±0.5 b	8091.7±202.1 b
	N2	534.4±17.8 a	45.3±0.8 a	45.2±0.2 c	8758.7±197.8 a
	N3	546.5±7.8 a	44.4±0.7 ab	44.4±0.3 d	8400.1±310.3 b
	N4	545.0±6.3 a	44.2±0.7 ab	44.0±0.1 d	8266.9±35.1 b
	W0N0	248.8±18.8 c	23.0±1.1 c	49.1±0.4 a	2046.9±6.3 c
	W0N1	457.5±7.5 b	41.8±0.6 b	46.2±0.5 b	7553.4±182.3 b
	W0N2	506.3±23.8 a	44.7±0.3 a	45.4±0.3 b	8234.2±124.8 a
	W0N3	513.8±1.3 a	43.6±1.2 a	44.4±0.5 c	7924.4±382.1 ab
	W0N4	521.7±3.8 a	43.3±0.2 a	43.9±0.6 c	7828.7±218.3 ab
	W2N0	384.2±26.7 c	26.8±0.8 b	49.5±0.3 a	3014.9±232.2 b
	W2N1	525.0±31.2 b	44.9±0.2 a	45.9±0.5 b	8630.0±431.8 a
	W2N2	562.5±13.0 ab	45.9±1.2 a	45.1±0.1 c	9283.1±475.6 a
	W2N3	579.2±15.1 a	45.1±0.2 a	44.4±0.2 d	8875.8±286.1 a
	W2N4	568.3±11.8 a	45.0±1.3 a	44.1±0.3 d	8705.1±185.9 a
	F-value				
	W	128.7***	54.6***	0.0 ^{ns}	88.0***
	N	178.5***	646.6***	169.4***	501.5***
	W×N	5.8**	2.6 ^{ns}	0.9 ^{ns}	0.1 ^{ns}
2023–2024	W0	464.2±4.0 b	31.1±0.4 b	45.9±0.1 a	5648.4±119.4 b
	W2	591.0±5.1 a	37.7±0.7 a	45.9±0.2 a	7824.5±73.6 a
	N0	316.5±1.0 d	25.9±0.8 c	49.1±0.3 a	3020.6±200.6 c
	N1	561.9±5.3 c	33.7±1.3 b	46.3±0.1 b	7477.2±225.2 b
	N2	591.2±3.8 a	38.0±1.5 a	45.8±0.1 b	8002.0±77.6 a
	N3	590.5±2.0 a	37.3±0.3 a	44.8±0.5 c	7842.7±50.6 a
	N4	577.9±12.3 b	37.3±0.6 a	43.6±0.3 d	7339.8±29.1 b
	W0N0	273.1±24.4 c	23.2±0.3 c	49.8±0.2 a	2494.2±265.7 c
	W0N1	483.8±10.9 b	31.0±1.1 b	46.5±0.2 b	6319.4±164.0 ab
	W0N2	515.0±6.5 ab	34.1±1.1 a	45.7±0.6 c	6623.4±116.2 a
	W0N3	532.3±20.2 a	33.7±1.5 a	44.2±0.4 d	6564.5±28.9 ab
	W0N4	517.1±27.7 ab	33.8±1.4 a	43.5±0.1 e	6240.6±223.2 b
	W2N0	360.0±22.5 c	28.6±1.3 c	48.4±0.3 a	3547.0±162.8 c
	W2N1	640.0±5.0 b	36.4±1.6 b	46.2±0.1 b	8635.0±333.9 b

(续表 5)

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spikes ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm^{-2})
	W2N2	667.5 $\pm$ 10.0 ab	41.8 $\pm$ 2.2 a	46.0 $\pm$ 0.4 b	9380.6 $\pm$ 271.5 a
	W2N3	648.8 $\pm$ 16.3 ab	40.9 $\pm$ 1.5 a	45.3 $\pm$ 0.7 b	9120.9 $\pm$ 130.1 a
	W2N4	638.8 $\pm$ 11.3 b	40.8 $\pm$ 0.2 a	43.8 $\pm$ 0.5 c	8439.0 $\pm$ 164.9 b
	<i>F</i> -value				
	W	408.4***	181.3***	0.0 ^{ns}	850.7***
	N	286.0***	86.9***	149.1***	630.4***
	W $\times$ N	4.1*	0.9 ^{ns}	7.6**	15.8***

处理同图 2。同列数据后的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。ns 表示无显著差异; *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。W 代表水分主处理效应, N 代表施氮量副处理效应, W $\times$ N 代表水分主处理与施氮量副处理之间的交互作用效应。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters within a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns: no significant difference; *, **, and *** indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively. W: main effect of water; N: main effect of N rate; W $\times$ N: water-by-N interaction.

2.4 冬小麦籽粒产量、氮素积累量与施氮量的关系

通过对 2 种水分条件下施氮量与产量、氮素积累量进行回归分析(图 8), 结果表明施氮量对二者均存在阈值效应。在 W0 条件下, 拟合方程显示最高产量为 7473.6 kg hm^{-2} , 最大氮素积累量为 222.4 kg hm^{-2} , 对应施氮量分别为 273.1 kg hm^{-2} N 和 289.1 kg hm^{-2} N。实际观测中, W0N2 处理的平均产量为 7428.8 kg hm^{-2} , 氮积累量为 218.6 kg hm^{-2} , 与拟合最大值高度接近, 但其对应施氮量较拟合最优值分别低 13.8%和 20.5%。说明在水分受限条件下, 实际最佳施氮量低于理论拟合值, 作物对氮肥的响应更为敏感。在 W2 条件下, 拟合所得最高产量为 9266.5 kg hm^{-2} , 最大氮素积累量为 279.6 kg hm^{-2} , 对应施

氮量分别为 265.4 kg hm^{-2} N 和 289.7 kg hm^{-2} N。W2N2 处理实际平均产量为 9331.8 kg hm^{-2} , 氮积累量为 277.1 kg hm^{-2} , 亦接近拟合最大值, 其施氮量较拟合值分别低 10.6%和 20.7%。这表明水分优化有助于提升作物对氮肥的利用效率, 使实际高产所需施氮量趋于合理水平。综合两种水分条件可见, 产量与氮素积累量均随施氮量增加呈先增后降趋势, 且在 N2 处理(240 kg hm^{-2} N)达到实际最大值。尽管拟合方程指示理论最优施氮量偏高, 但实际生产中施氮量超过 240 kg hm^{-2} N 并未带来产量和氮素积累量进一步增加。由此可见, 冬小麦产量和氮素积累对施氮量的响应存在明确阈值, 合理控制施氮量在 240 kg hm^{-2} N 左右可实现产量与氮素高效积累的协同优化。

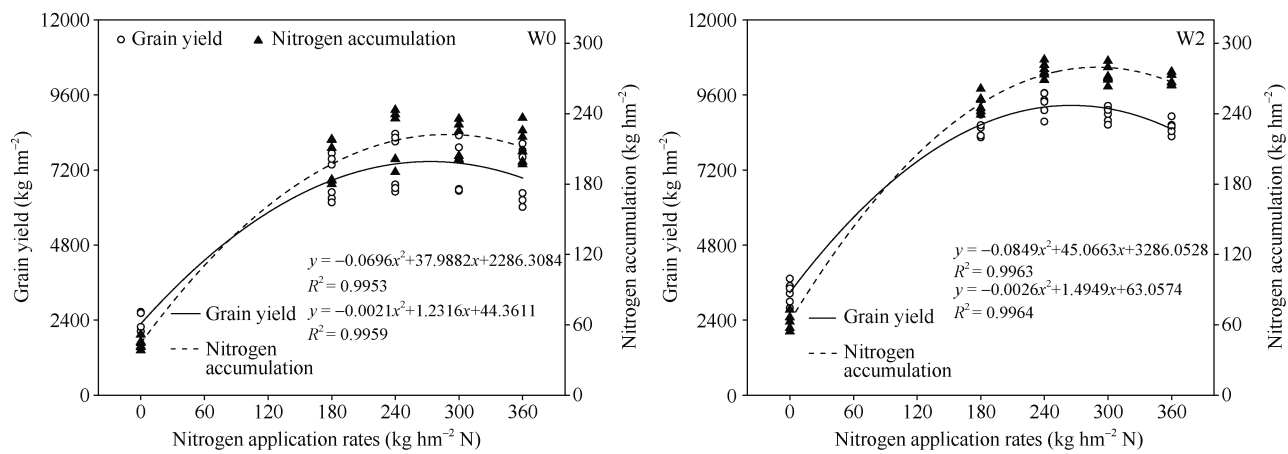


图 8 不同水分下小麦籽粒产量、氮素积累量与施氮量的关系
Fig. 8 Relationships among grain yield, nitrogen accumulation, and N application rate under different water regimes
处理同图 2。Treatments are the same as those given in Fig. 2.

3 讨论

3.1 水氮协同对冬小麦干物质积累、转运和分配的调控机制及其产量意义

干物质积累、转运与分配是产量形成的物质基础, 受水氮互作显著调控^[18-20]。冬小麦干物质积累呈现典型的 Logistic 曲线特征: 在播种—越冬期和越冬—拔节期阶段, 积累速度相对缓慢; 进入拔节—开花期的关键生育期后, 积累速率显著加快, 成为全生育期物质积累的主要贡献阶段; 开花之后的开花期—灌浆期和灌浆—成熟期阶段, 积累速率逐渐放缓^[21]。本研究结果表明, 灌水和施氮均对拔节至成熟期的干物质积累具有促进作用。相较于 W0 和 N0 处理, W2 和施氮(N1~N4)均提高了各生育阶段特别是拔节—开花期阶段的干物质积累量(图 2)。这主要源于拔节期和开花期是冬小麦水肥敏感的关键时期, 此期间优化水分供应并追施氮肥, 能够有效增大叶面积、提升叶片光合效率、促进分蘖成穗, 为干物质的持续高效积累奠定基础^[22-23]。值得注意的是, 开花—灌浆期是干物质同化产物向籽粒转运的关键窗口期, 此阶段的水氮供应状态(如土壤水、氮有效性)对光合产物的持续产生与源库流调控具有极其显著的影响^[24]。然而, 氮肥对干物质生产的调控存在阈值^[25]。过量施氮将导致无效分蘖激增, 群体结构郁闭, 透光透风性变差, 最终降低群体光合效率并阻碍干物质的持续积累^[26]。这可能是 W2 与适量减氮(N2)协同处理(W2N2)在两年度试验中均实现干物质积累量最大化的主要原因(图 2)。灌浆期间籽粒的充实, 既依赖于花后光合作用产生的同化物质, 也依赖于开花前贮存于营养器官(叶、茎鞘)中的同化物向籽粒的转运与再分配^[27]。水分胁迫往往会加速叶片衰老, 使得花前同化物的转运提前且转运效率相对提高, 但同时抑制了花后光合作用^[8-9]。氮素作为叶绿素、光合酶与氮代谢酶的关键组分, 直接驱动叶片光合同化物及营养器官氮素的转运^[28]。适宜的氮素投入有助于促进营养器官贮存同化物向籽粒高效转运。本研究发现, 在水分受限的 W0 条件下, 适度减氮处理(N1, N2)通过优化干物质分配策略补偿了水分胁迫的负面影响。具体来说, 适度减氮处理降低了对花前干物质转运对籽粒的贡献率的依赖, 同时显著提高了花后干物质同化量及其花后干物质同化量对籽粒的贡献率, 从而有效弥补了水分胁迫下源器官(叶片)同化能力的不足^[29]。而在水

分优化的 W2 条件下, 协同适量减氮处理(N2)有利于平衡花前和花后干物质转运对籽粒的贡献(花前干物质转运对籽粒的贡献率: 37.4%~41.9%, 花后干物质同化对籽粒的贡献率: 58.1%~62.6%), 这与其在成熟期籽粒获得最高干物质分配比例的结果一致(图 4)。这表明水氮协同优化了同化物向籽粒的高效转运路径。Moradi 等^[8]指出, 节水减氮可通过增强茎鞘物质转运率来提升产量。然而, 本研究在黏壤潮土区发现, 对于增产的贡献, 在补灌条件下尤其突出的是花后同化量(占比超过 60%)。我们推测优化水分供给后, 黏壤潮土的“高保肥力、低导水性”特性改善了土壤物理结构和根系活力, 从而有效延长叶片功能期并提升花后碳同化效率^[12]。综上所述, 在本试验条件下, 拔节+开花期补灌结合适量减氮的水氮管理模式(W2N2), 其增产增效的生理基础主要体现在: (1) 通过对关键需水需肥期(拔节—开花期)精准供水和追氮, 延长了冠层光合功能期, 最大化拔节—开花期的高强度干物质累积(图 2); (2) 优化了同化物在营养器官与经济器官间的分配比例, 促进了成熟期籽粒库容的有效填充(图 4); (3) 在水分优化基础上, 有效增强了花后阶段的光合产物同化能力(表 2), 成为高产的核心驱动力。因此, 本研究揭示了在该区域特定的黏壤潮土环境下, 水氮协同通过构建“花前物质奠定基础, 花后同化主导灌浆”的干物质动态积累与高效分配模式, 是实现冬小麦高产稳产的关键生理路径。未来研究可在本试验基础上, 结合酶学与分子生物学手段, 进一步解析水氮协同对灌浆期碳氮代谢酶(如蔗糖合酶、谷氨酰胺合酶等)活性的调控作用, 以阐明其内在的分子生理驱动机制。

3.2 水氮协同对氮素吸收转运的优化效应与利用效率提升途径

氮素是限制作物产量的关键因子, 其吸收、转运与利用直接决定氮肥投入的效益^[23]。本研究结果表明, 水氮协同调控了冬小麦氮素积累与转运过程(图 5、图 6 和表 3)。W2 使成熟期植株总氮积累量平均提高了 27.5%, 且氮素向籽粒的分配比例增加(W2 处理下籽粒氮积累量占总量比例达 60%以上)。这可能是由于补灌后土壤水分有效性增强, 硝化作用加快, 促进了根系吸氮能力, 进而提高了氮素有效性^[30]。何昕楠等^[17]发现, 微喷补灌可改善土壤孔隙结构, 促进氮素向根际迁移, 与本研究 W2 处理下 0~40 cm 土层硝态氮残留量平均降低 23.4%的

结果一致(图 7)。但需注意,灌水也加剧了硝态氮向深层的迁移(40~100 cm 土层残留量平均增加了 32.2%),表明过量灌溉可能增加淋溶风险^[5-6]。施氮量对氮素积累的调控呈典型阈值效应。本研究中,与 N0 相比,施氮处理(N1~N4)使开花期氮素积累量平均提高 418.7%,但过量施氮(N4)导致氮素利用效率降低(表 4)。例如,氮肥偏生产力在 N4 处理下平均仅为 21.7 kg kg⁻¹,较 N2 处理平均降低了 37.9%。这与吕广德等^[18-19]的结论一致,其指出施氮量超过 240 kg hm⁻² N 时,氮素农学效率显著降低。本研究进一步发现, W2N2 处理的花前氮素转运量和花后氮素同化量均较高(分别平均达 183.7 kg hm⁻² 和 26.9 kg hm⁻²),且花前氮素转运对籽粒的贡献率与花后氮素同化对籽粒的贡献率趋于平衡。这表明水氮协同不仅增强氮素吸收,还改善了其在生殖生长阶段的分配效率。此外,水氮互作对氮素利用效率的提升机制体现在多维度。首先,补灌通过缓解干旱胁迫,提高氮素吸收效率(W2 处理较 W0 平均提升 26.7%),这与 Kang 等^[14]关于水分优化增强硝酸还原酶活性的报道一致。其次,减氮至 240 kg hm⁻² N 使氮素利用效率稳定在 33.5~34.1 kg kg⁻¹,显著高于 N4 处理(31.1~33.4 kg kg⁻¹)。值得注意的是,水氮协同效应在雨养和补灌条件下存在差异。在 W0 条件下,减氮(N2)通过提高氮素生理效率补偿吸收不足;W2 条件下,N2 处理则同步优化氮素的吸收与利用。这种差异可能与黏壤土特有的“高保肥力-低导水性”有关^[11-12]。水分优化后,土壤氮素迁移性增强,根系吸氮效率提升,从而增强减氮的正面效应^[31]。本研究还发现,水氮协同显著降低土壤硝态氮残留(图 7)。W2N2 处理下 0~100 cm 土层硝态氮积累量较 W2N4 平均降低了 19.8%,这主要归因于减氮 33.3%的直接效应,印证了“以水调氮”在减少环境风险方面的潜力^[7]。王仕琴等^[5]指出,华北地下水硝酸盐超标与氮肥过量施用关联密切,而本研究表明,结合补灌的减氮策略可兼顾高产与环保。未来需通过长期定位试验,评估水氮优化对土壤氮库平衡的持续影响。

3.3 水氮协同实现冬小麦高产与绿色高效的生理基础及推广价值

产量是水氮管理的最终体现,其构成因素受水氮互作精细调控^[25]。本研究表明,在 2 年试验中, W2N2 在获得最高产量(2 年平均达 9331.9 kg hm⁻²)的同时,氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮素利用

效率和氮肥农学效率较 W2N4 分别平均提高了 63.5%、53.6%、6.0%和 71.9% (表 5)。这一结果突破了传统“大水大肥”模式下产量与效率矛盾的困境,为黄淮南片麦区绿色转型提供了可行路径。从产量构成因素解析,水氮协同通过差异化调控穗数、穗粒数和千粒重实现增产。W2 主要增加单位面积穗数和穗粒数,这可能与其在拔节—开花期保障了分蘖成穗与小花发育所需的水分有关^[32]。此外,施氮使穗部性状得到优化。N2 处理下穗数、穗粒数较 N0 分别平均增加 68.8%和 82.0%,但过量施氮(N4)导致千粒重下降,反映库源关系失衡^[33-34]。同时,水氮互作进一步强化了各产量构成因素间的协同效应。在 W2N2 处理下,穗数(2 年平均达 615.0×10⁴ hm⁻²)、穗粒数(2 年平均达 43.9 粒 穗⁻¹)与千粒重(2 年平均达 45.6 g)均维持在较高水平,形成“穗数奠基、穗粒主导、粒重维稳”的增产模式(表 5)。值得注意的是,雨养条件下 W0N2 的产量(2 年平均为 7428.8 kg hm⁻²)接近拟合最高值(7473.6 kg hm⁻²),但需付出更高氮成本(施氮量 273.1 kg hm⁻² N);而补灌后 W2N2 的实际施氮量(240 kg hm⁻² N)低于理论最优值(265.4 kg hm⁻² N),表明水分优化可降低氮肥需求,这与沈庄园^[35]在山东麦区的研究结果一致。从生理机制看,水氮协同的高产高效源于三方面:一是光合产物积累与分配优化(图 2、图 3 和图 4);二是产量和氮积累量均在施氮量 240 kg hm⁻² N 时达到峰值,超过此阈值则呈报酬递减(图 8);三是土壤-作物系统互作改善,补灌激活了土壤残留氮素,减氮则降低了根系氮胁迫,二者协同提高根系活力^[10]。本研究进一步发现,在黏壤潮土区,水氮优化可使花后氮同化量贡献率提高至 60%以上,支撑了籽粒蛋白合成^[36]。本研究明确了黏壤潮土区“拔节+开花期各补灌 75 mm+减氮至 240 kg hm⁻² N”为最优模式,其较传统模式(360 kg hm⁻² N)节氮 33.3%,平均增产 8.9%;揭示了水氮协同的阈值效应(施氮量 240 kg hm⁻² N 为临界点),为区域精准施肥提供了依据;此外,通过量化氮素转运参数,为作物模型开发提供了数据支撑,本研究成果为冬小麦高产高效生产提供了一种可推广的水氮协同优化技术模式。然而,本研究基于 2 年试验,未监测土壤水分的实际情况,这可能会对深入理解水分胁迫发生的具体时期和程度造成限制,其结论在年际波动气候下的稳定性需长期验证。未来将整合连续的土壤墒情监测结合遥感与模型技术,以更精准地量化土壤水分状况,并建立土

壤水-植株氮-产量形成的动态耦合模型, 实现水氮管理的动态优化。总之, 水氮协同通过调控物质积累、氮素利用及产量构成, 实现了冬小麦生产“减氮增效”目标。这一策略对推动黄淮南片麦区农业可持续发展具有重要实践意义。

4 结论

本研究结果表明, 拔节+开花期补灌结合减氮处理较雨养和传统高氮管理模式具有显著的水氮协同优化效应。拔节+开花期补灌通过增强花后光合产物积累, 使干物质积累量平均提高了 28.1%, 氮素吸收效率平均提升了 26.7%; 减氮至 $240 \text{ kg hm}^{-2} \text{ N}$ 在维持产量的同时, 氮肥偏生产力和氮肥农学效率较传统施氮量($360 \text{ kg hm}^{-2} \text{ N}$)分别提高了 61.2%和 67.9%。水氮互作通过优化花前营养器官氮素转运和花后同化物向籽粒分配, 最终在协同增加单位面积穗数和穗粒数的同时稳定千粒重, 进而实现产量最大化。因此, 拔节+开花期各补灌 75 mm 配合减氮至 $240 \text{ kg hm}^{-2} \text{ N}$ 是豫东南黏壤潮土区实现冬小麦产量与氮素利用效率协同提升的优化模式, 可为黄淮南片麦区高产高效绿色栽培技术提供理论支撑。

References

- [1] 吴柳格, 陈坚, 张鑫, 等. 近二十年国审冬小麦品种的产量与品质性状变化趋势研究. 作物学报, 2025, 51: 1814–1826.
Wu L G, Chen J, Zhang X, et al. Changes in yield and quality traits of nationally approved winter wheat varieties in China over last twenty years. Acta Agron Sin, 2025, 51: 1814–1826 (in Chinese with English abstract).
- [2] 国家粮油信息中心: 世界粮油供需状况月报(2024 年 10 期). 中国粮食经济, 2025(1): 41–44.
National grain and oil information center: monthly report on world grain and oil supply and demand (10 issues in 2024). China Grain Econ, 2025(1): 41–44 (in Chinese).
- [3] 吴慧峰. 综合多源遥感数据的冬小麦干旱监测方法研究. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2024.
Wu H F. Winter Wheat Drought Monitoring Method Based on Multi-source Remote Sensing Data. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘卫星. 不同水氮运筹对冬小麦根系生长及氮素利用调控的研究. 河南农业大学博士学位论文, 河南郑州, 2018.
Liu W X. Effect of Different Irrigation and Nitrogen Regimes on Root Growth and Nitrogen Utilization of Winter Wheat. PhD Dissertation of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性. 中国生态农业学报, 2018, 26: 1476–1482.
Wang S Q, Zheng W B, Kong X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain. Chin J Eco-Agric, 2018, 26: 1476–1482 (in Chinese with English abstract).
- [6] 白芳芳. 地下水埋深和施氮量对麦玉轮作农田地下水硝酸盐污染阻控机理研究. 中国农业科学院博士学位论文, 北京, 2022.
Bai F F. Study on the Resistance Mechanism of Groundwater Nitrate Pollution by Groundwater Depth and Nitrogen Application Rate in the Wheat-maize Rotation Farmland. PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [7] 骆晓声, 寇长林, 王小非, 等. 施氮量对潮土区冬小麦-夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 29–37.
Luo X S, Kou C L, Wang X F, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo-aquic soil on a winter wheat-summer maize rotation farmland. Chin J Eco-Agric, 2021, 29: 29–37 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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. Agric Water Manag, 2022, 263: 107449.
- [9] Zhang H B, Han K, Gu S B, et al. Effects of supplemental irrigation on the accumulation, distribution and transportation of ^{13}C -photosynthate, yield and water use efficiency of winter wheat. Agric Water Manag, 2019, 214: 1–8.
- [10] 王壮壮. 施氮量和种植密度对冬小麦根系形态分布特征与氮素利用效率及产量的影响. 河南农业大学硕士学位论文, 河南郑州, 2022.
Wang Z Z. Effects of Nitrogen Application and Planting Density on Root Morphological Distribution Characteristics and Nitrogen Use Efficiency and Yield of Winter Wheat. MS Thesis of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王继唯. 不同土壤质地上氮肥基追比对冬小麦生物效应和土壤性状的影响. 河北农业大学硕士学位论文, 河北保定, 2021.
Wang J W. Effects of N and Topdressing Ratios on Biological Effects and Soil Properties of Winter Wheat in Different Soil Textures. MS Thesis of Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [12] 周晓鑫. 土壤质地和含水量对紫花苜蓿苗期生长和根系形态的影响. 中国农业科学院硕士学位论文, 北京, 2021.
Zhou X X. Effects of Soil Texture and Soil Water Content on Seedling Growth and Root Morphology of Alfalfa. MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘北城, 张艳艳, 戎亚思, 等. 干旱胁迫下喷施 14-羟基芸苔素甾醇对冬小麦穗花发育及碳氮代谢的调控. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1004–1015.
Liu B C, Zhang Y Y, Rong Y S, et al. Regulation of spraying 14-hydroxylated brassinosteroid on spike and fertile floret development and carbon and nitrogen metabolism of winter wheat under drought stress. J Plant Nutr Fert, 2021, 27: 1004–1015 (in Chinese with English abstract).
- [14] Kang J, Chu Y Y, Ma G, et al. Physiological mechanisms underlying reduced photosynthesis in wheat leaves grown in the field

- under conditions of nitrogen and water deficiency. *Crop J*, 2023, 11: 638–650.
- [15] 亢秀丽, 马爱平, 靖华, 等. 微喷限水灌溉对冬小麦产量及水氮利用效率的影响. *作物学报*, 2024, 50: 3107–3117.
Kang X L, Ma A P, Jing H, et al. Effects of micro-sprinkling limited irrigation on winter wheat yield, water and nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 3107–3117 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王永华, 刘焕, 辛明华, 等. 耕作方式与灌水次数对砂姜黑土冬小麦水分利用及籽粒产量的影响. *中国农业科学*, 2019, 52: 801–812.
Wang Y H, Liu H, Xin M H, et al. Effects of tillage practices and irrigation times on water use efficiency and grain yield of winter wheat in lime concretion black soil. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 801–812 (in Chinese with English abstract).
- [17] 何昕楠, 林祥, 谷淑波, 等. 微喷补灌对麦田土壤物理性状及冬小麦耗水和产量的影响. *作物学报*, 2019, 45: 879–892.
He X N, Lin X, Gu S B, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on soil physical properties, water consumption and grain yield of winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 879–892 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吕广德, 亓晓蕾, 张继波, 等. 中、高产型小麦干物质和氮素累积转运对水氮的响应. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27: 1534–1547.
Lyu G D, Qi X L, Zhang J B, et al. Response of nitrogen and dry matter accumulation in middle and high yield wheat cultivars to water and nitrogen supply. *J Plant Nutr Fert*, 2021, 27: 1534–1547 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响. *应用生态学报*, 2020, 31: 2593–2603.
Lyu G D, Wang C, Jin X M, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 2593–2603 (in Chinese with English abstract).
- [20] 陈钰蓉, 范震, 赵有欣, 等. 水分与控释尿素耦合对冬小麦干物质积累和氮素转运及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(12): 173–179.
Chen Y R, Fan Z, Zhao Y X, et al. Co-effects of irrigation and polymer coated urea on biomass and nitrogen accumulation, transport and yield of winter wheat. *Soil Fert Sci China*, 2023(12): 173–179 (in Chinese with English abstract).
- [21] 侯思宇, 王国瑾, 韦金贵, 等. 绿肥配施化学氮肥对西北干旱灌区小麦干物质积累及产量形成的影响. *作物学报*, 2026, 52: 1208–1219.
Hou S Y, Wang G C, Wei J G, et al. Effect of green manure combined with chemical nitrogen fertilizer on dry matter accumulation and yield formation of wheat in arid irrigation areas of Northwestern China. *Acta Agron Sin*, 2026, 52: 1208–1219 (in Chinese with English abstract).
- [22] Shen X J, Liu J M, Liu L, et al. Effects of irrigation and nitrogen topdressing on water and nitrogen use efficiency for winter wheat with micro-sprinkling hose irrigation in North China. *Agric Water Manag*, 2024, 302: 109005.
- [23] Han S W, Wang C X, Zheng Y S, et al. The yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in the North China Plain could be improved through enhanced tiller formation and biomass transport. *Field Crops Res*, 2024, 318: 109570.
- [24] 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. 河南农业大学博士学位论文, 河南郑州, 2023.
Kang J. Studies on Synergistic Effect and Mechanisms of Yield and Efficiency in Optimized Cultivation Technology of Winter Wheat. PhD Dissertation of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [25] Wang Y, Shi W J, Wen T Y. Prediction of winter wheat yield and dry matter in North China Plain using machine learning algorithms for optimal water and nitrogen application. *Agric Water Manag*, 2023, 277: 108140.
- [26] 郝倩倩, 兰会杰, 董文楠, 等. 施氮量和种植密度对强筋小麦冠层光截获特性和籽粒产量的影响. *麦类作物学报*, 2025, 45: 482–491.
Hao Q Q, Lan H J, Dong W N, et al. Effects of nitrogen application amount and plant density on canopy light interception characteristics and grain yield of strong gluten wheat. *J Triticeae Crops*, 2025, 45: 482–491 (in Chinese with English abstract).
- [27] Yan S C, Wu Y, Fan J L, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes to enhance winter wheat grain yield by improving post-anthesis dry matter accumulation and translocation in northwest China. *Agric Water Manag*, 2022, 271: 107782.
- [28] Wang Y X, Xu Y R, Guo Q, et al. Adopting nitrogen deep placement based on different simulated precipitation year types enhances wheat yield and resource utilization by promoting photosynthesis capacity. *Field Crops Res*, 2023, 294: 108862.
- [29] Zhao K N, Wang H T, Wu J Z, et al. One-off irrigation improves water and nitrogen use efficiency and productivity of wheat as mediated by nitrogen rate and tillage in drought-prone areas. *Field Crops Res*, 2023, 295: 108898.
- [30] Feng S W, Ding W H, Shi C C, et al. Optimizing the spatial distribution of roots by supplemental irrigation to improve grain yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2023, 275: 107989.
- [31] Rasmussen I S, Dresbøll D B, Thorup-Kristensen K. Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization: effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *Eur J Agron*, 2015, 68: 38–49.
- [32] 尚云秋. 拔节期补灌对播期和密度组合冬小麦分蘖成穗和小花发育的影响. 山东农业大学博士学位论文, 山东泰安, 2023.
Shang Y Q. Effects of Supplemental Irrigation at Jointing on Wheat Tiller Spike Formation and Floret Development in Combination with Sowing Date and Planting Density. PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [33] 聂峥睿, 坚天才, 张战胜, 等. 施氮量对花后高温春小麦源库特征及关系的影响. *核农学报*, 2024, 38: 2421–2431.
Nie Z R, Jian T C, Zhang Z S, et al. Effects of nitrogen rates on source-sink characteristics and relationship of spring wheat after anthesis under high temperature. *J Nucl Agric Sci*, 2024, 38: 2421–2431 (in Chinese with English abstract).
- [34] Mu H M, Wang Z Z, Sun L F, et al. Optimizing nitrogen fertilization and planting density management enhances lodging resistance and wheat yield by promoting carbohydrate accumulation and single spike development. *Crop Sci*, 2024, 64: 3461–3479.

- [35] 沈庄园. 水氮优化管理对冬小麦产量及水氮利用效率的影响. 山东农业大学硕士学位论文, 山东泰安, 2024.
Shen Z Y. Effects of Optimal Water and Nitrogen Management on Yield and Water and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat. MS Thesis of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王金凤, 王壮壮, 谷丰序, 等. 氮密调控对两个冬小麦品种碳氮代谢及产量的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 4070–4083.
Wang J F, Wang Z Z, Gu F X, et al. Effects of nitrogen fertilizer and plant density on carbon metabolism, nitrogen metabolism and grain yield of two winter wheat varieties. Sci Agric Sin, 2021, 54: 4070–4083 (in Chinese with English abstract).