

减量施氮下华北平原冬小麦冠层结构重塑与氮肥增效机制

黄建新, 马静丽, 韩茂林, 陈彭, 王小洁, 蒿宝珍, 陈磊山

(新乡学院 生物工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要:针对华北平原冬小麦生产面临的单产瓶颈与氮肥高投入难题,研究通过三年田间定位试验,设置5个处理,解析减量施氮对冠层结构、产量及氮肥利用的调控机制.结果表明,减量施氮显著压缩上位叶片,优化冠层结构,其中倒二叶对氮素敏感性最高;茎节性状上,N₂处理维持上部节间长度与基部茎秆直径,株高仅降3.9%;光分布方面,减量施氮使花后叶面积指数(LAI)降低18.6%~42.7%,但冠层基部透光率提升1~3倍;产量形成上,籽粒产量随LAI呈Logistic增长,N₂产量较N₄降19.1%,但氮肥偏生产力(PFPN)显著提高至44.1 kg·kg⁻¹.综上,减量施氮至180 kg·hm⁻²通过优化冠层光分布与茎穗结构稳定性,实现减产可控的资源高效利用,可作为华北平原冬小麦绿色生产的氮肥管理模式.

关键词:冬小麦;氮肥;冠层结构;产量;氮肥偏生产力

中图分类号:S311

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)02-0102-08

小麦作为我国三大主粮作物,对国家粮食安全具有战略意义.2024年全国粮食总产量突破7亿t,其中小麦产量达1.4亿t^[1].华北平原作为核心产区,贡献了全国约2/3的小麦产量^[2].当前小麦生产面临双重挑战,耕地资源约束导致种植面积扩张受限,且单产增速显著放缓,2020—2024年年均增长仅49.3 kg·hm⁻²,较2016—2020年的85.6 kg·hm⁻²下降42.4%^[1],表明产量提升已进入瓶颈期.与此同时,高资源投入(化肥、灌溉、农药)与低利用效率并存,引发严峻环境代价.因此,协同提升单产与资源效率是小麦生产可持续发展的必然路径.

氮素对小麦产量形成至关重要,2010—2020年华北平原小麦增产主要依赖氮肥高投入^[3].然而,当前农户平均施氮量(249 kg·hm⁻²)远超田间试验推荐量(128 kg·m⁻²)^[4],过量施氮不仅降低氮肥利用率,更导致多重环境风险,全球60%以上氮污染源来自农业^[5],具体表现为地下水硝酸盐污染^[6]、水体富营养化^[7]、土壤酸化^[8]、N₂O排放^[9]及氨挥发^[10].因此,氮肥减施势在必行.当前小麦减量施氮研究主要聚焦施氮量阈值优化、技术集成及品种适配等方向.有研究指出,基于土壤氮测试的推荐施肥可使冬小麦施氮量降低35%~40%而不显著减产^[11].小麦生产中使用新型核抑制剂包膜尿素,通过同步释放氮肥和抑制剂,产量和氮肥表观利用效率分别提高了8.82%~12.09%和16.91%~26.24%^[12].氮高效型小麦品种(如科农9204)在低氮条件下产量稳定性显著高于氮低效型品种(京411),且氮吸收效率和氮利用效率分别提升28%和19%^[13].然而,现有减量施氮研究对冠层分层结构(叶片-茎节-穗部)适应性响应的系统性解析严重缺失.这种形态-功能协同调控恰是突破“减氮减产”矛盾的关键^[14],尤其华北平原小麦高密度种植下,减量施氮如何重塑小麦冠层光分布与茎穗稳定性仍不明晰.

收稿日期:2025-06-05;**修回日期:**2025-07-26.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2300200);河南省科技研发计划联合基金项目(235101610045);河南省自然科学基金项目(252300423079).

作者简介:黄建新(1967—),男,河南新乡人,新乡学院副教授,研究方向为植物生理,E-mail:13837365438@163.com.

通信作者:陈磊山,E-mail:chenleishan@aliyun.com;蒿宝珍,E-mail:haobaozhenxx@126.com.

引用本文:黄建新,马静丽,韩茂林,等.减量施氮下华北平原冬小麦冠层结构重塑与氮肥增效机制[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(2):102-109.(Huang Jianxin, Ma Jingli, Han Maolin, et al. Canopy structural adaptation and nitrogen efficiency in winter wheat under reduced nitrogen input in the North China Plain[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(2): 102-109. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.06.05.0002.)

作物冠层结构通过调控光能截获、氮素分配与碳同化效率直接影响产量形成^[14-15]。尽管上述减量施氮技术取得进展,但其通过冠层结构优化实现增效的机制尚未明晰。氮肥管理是优化冠层结构的关键,适度增氮可提高叶面积指数(LAI)与光合有效辐射截获率^[16-19],但过量施氮会增加冠层上部消光系数,降低基部透光率,加速下部叶片衰老^[17]。现有研究多聚焦增氮效应,而减量施氮对冠层分层结构(叶片-茎节-穗部)的影响尚未系统解析。本研究通过分层解析叶片形态可塑性、茎节抗逆稳态与穗部结构补偿效应,明确减量施氮对小麦冠层结构的重塑规律,揭示减量施氮下小麦冠层形态-光能利用-产量形成的级联调控机制,为协同优化氮效率与抗倒伏提供新视角,可为破解华北平原小麦生产中依赖高氮投入提供生理生态依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2020—2023 年在中国农业科学院作物科学研究所新乡基地(37°41′02″N,116°37′23″E)进行,试验期冬小麦生育期总降雨量分别为 148、72 和 238 mm,自然降水不能满足冬小麦生长发育需要,需补充灌溉。试验田土壤类型为砂壤土,0~20 cm 土壤有机质含量 12.2 g·kg⁻¹,速效氮 62.5 mg·kg⁻¹,速效磷 15.6 mg·kg⁻¹,速效钾 109.8 mg·kg⁻¹,pH 8.1。

试验采用 3 次重复的随机区组设计,共设 5 个氮肥处理,分别为不施氮肥(N0)、一次性底施纯氮 120 kg·hm⁻²(N1)、底施纯氮 120 kg·hm⁻²+追施 60 kg·hm⁻²(N2)、底施纯氮 120 kg·hm⁻²+追施 120 kg·hm⁻²(N3)和底施纯氮 120 kg·hm⁻²+追施 180 kg·hm⁻²(N4,对照),拔节期随灌溉追施氮肥。磷钾肥全部底施,施磷肥(P₂O₅)235 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)149 kg·hm⁻²。小麦播种前灌底墒水,浇水采用畦灌方式,每次灌水量为 750 m³·hm⁻²。3 个生长季的拔节期均进行灌溉,灌水量为 750 m³·hm⁻²,另外,2021—2022 年生长季开花期灌水 750 m³·hm⁻²。供试小麦品种为百农 4199。小区面积为 20 m²(2 m×10 m),行距 20 cm,基本苗 3.75×10⁶株·hm⁻²,进行常规田间管理。播种日期分别为 2020 年 11 月 4 日、2021 年 11 月 1 日和 2022 年 10 月 28 日,于 2021 年 6 月 1 日、2022 年 5 月 30 日和 2023 年 5 月 31 日收获。

1.2 测定项目与方法

株高及茎节性状:成熟期每小区随机选取 10 株代表性植株,采用钢卷尺(精度 0.1 cm)测量地面至穗顶(不含芒)的株高;分离主茎后,测量倒一节(穗下第一节)、倒二节、倒三节长度(节间基部至顶部距离),以游标卡尺(精度 0.01 mm)测量主茎基部第二节中央直径。

叶片及穗性状:开花期每小区选取 20 个主茎,测量完全展开的倒一叶(旗叶)、倒二叶、倒三叶的长度(叶枕至叶尖)与最大宽度(垂直于中脉);穗长(穗轴基部至顶端)、穗宽(最宽处)、穗厚(垂直于穗轴方向)使用游标卡尺测量,叶片面积采用长宽系数(校正系数 0.83)法测定,穗面积参照袁邵峰等^[20]和 TEARE 等^[21]的方法测定。

叶面积指数(LAI)和透光率:LAI-2200c 冠层分析仪于花后 10 d(2021—2022 年生长季)和花后 4 和 15 d(2022—2023 年生长季)的上午 10:00—12:00(晴天)测量,探头置于冠层基部(距地面 10 cm),3 次重复。透光率(*Tr*)计算为, $Tr = I_b / I_a \times 100\%$,*I_b* 为冠层下光量子通量密度($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),*I_a* 为冠层上方入射光强, ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

籽粒产量:成熟期从各小区选取 2 m²(1 m×2 m)样点,单独人工收割,脱粒后风干计产,3 次重复。

氮肥偏生产力:氮肥偏生产力(PFPN,kg·kg⁻¹)=籽粒产量/施氮总量。

1.3 数据分析

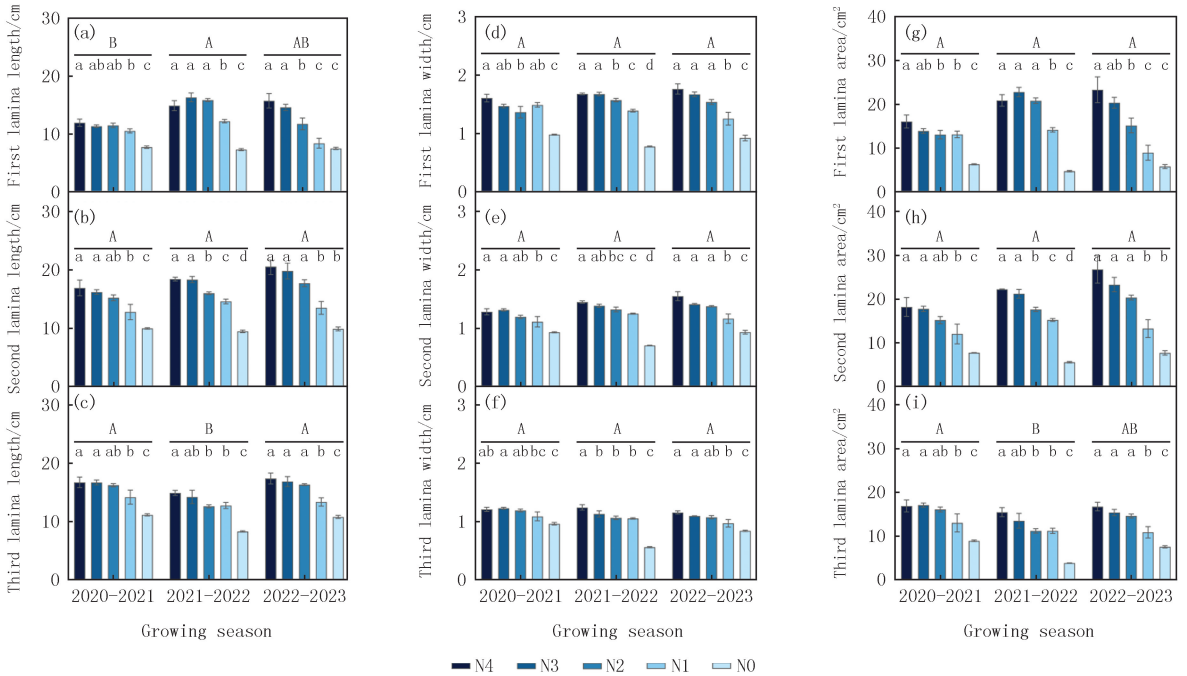
所有性状数据以平均值±标准误(SE)表示,采用 SAS 9.4 进行单因素方差分析(One-way ANOVA),处理间差异用 LSD 法检验($\alpha=0.05$)。采用 R 3.5.3 进行 Pearson 相关分析。产量与 LAI 的 Logistic 模型拟合采用 GraphPad Prism 8.0。

2 结果与分析

2.1 叶片形态

如图 1 所示,减量施氮显著降低各叶位叶片的形态参数(长度、宽度及面积; $P<0.05$)。3 年平均数据显

示,与 N4 相比,N3 处理各叶位叶长降幅不显著,而 N2 处理下倒二叶叶长显著降低 12.4% ($P < 0.05$),高于倒一叶(8.1%)和倒三叶(7.8%).N1 处理下倒一叶与倒二叶叶长降幅达 26.8%,显著高于倒三叶(17.8%),N0 处理下倒一叶(47.0%)和倒二叶(47.4%)降幅亦显著高于倒三叶(38.2%)(图 1(a-c)).另外,由施氮量与叶片长度的拟合曲线(附录图 S1(a))可以看出,随施氮量减少,倒二叶叶长下降趋势最为明显,其次为倒一叶和倒三叶.叶片宽度降幅由大到小表现为倒一叶,倒二叶,倒三叶(图 1(d-f)).与之对应,施氮量减少时倒一叶叶宽下降趋势最为明显,其次为倒二叶和倒三叶(图 S1(b)).叶面积变化规律相似,倒一叶与倒二叶降幅显著高于倒三叶(图 1(g-i)),且随施氮量减少,二者面积下降速率更快(图 S1(c)).总之,减量施氮优先压缩上位叶片(倒一叶、倒二叶)的形态尺寸(叶长降幅 7.8%~47.4%,叶宽降幅 9.3%~52.1%),其中倒二叶长度对氮素敏感性最高(图 S1(a)).这种形态重塑有利于形成紧凑冠层结构,进而提升冠层基部透光率.



注:误差线表示3次重复的标准误,其上所标不同小写字母表示同一生长季氮肥处理间差异显著(LSD, $P < 0.05$),不同大写字母表示不同生长季间差异显著(LSD, $P < 0.05$),全文同。

图1 不同氮肥处理下的叶片长度(a-c)、宽度(d-f)和叶面积(g-i)

Fig.1 The lamina length(a-c), lamina width(d-f), and lamina area(g-i) under different nitrogen treatments

2.2 茎节形态

氮肥处理显著影响株高、节间长度及基部茎秆形态($P < 0.05$;图 2).上部三节间长度(倒一节至倒三节)在 N2-N4 处理间无显著差异(图 2(a-c)).与 N4 相比,N1 处理下倒一节长度显著降低 9.5% ($P < 0.05$),降幅高于倒二节(7.9%)和倒三节(5.3%),N0 处理中倒一节降幅达 49.2%,显著高于其他节间(40.4%~40.8%).株高在 N3 与 N4 处理间无显著差异,而 N2、N1、N0 较 N4 分别降低 3.9%、9.6%和 45.4%(图 2(d)).相关分析表明,株高与各节间长度呈极显著正相关($R^2 > 0.83$, $P < 0.001$;图 2(f)).施氮量-株高拟合曲线(图 S1(d))显示,株高变化与倒一节长度高度同步($R^2 = 0.89$, $P < 0.001$),表明氮素主要通过调控倒一节长度影响株高.2020-2021 年生长季,基部节间直径随施氮量减少呈下降趋势,但 N4 与 N3 处理无显著差异,2021-2022 年和 2022-2023 年生长季,N2~N4 处理间基部节间直径保持稳定(图 2(f)),证实适量减氮($\geq 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可维持茎秆机械强度.

2.3 穗部形态

氮肥处理显著调控穗部形态参数(穗长、穗宽、穗厚及穗面积; $P < 0.05$;图 3).3 年数据整合分析表明,穗长与穗面积随施氮量减少呈下降趋势,穗厚度以 N3 处理最高(较 N4 增加 8.7%; $P < 0.05$),而 N2、N1 和 N0 分别降低 10.0%、24.5%和 43.8%(图 3).与 N4 相比,N3、N2、N1 处理的穗宽降幅分别为 9.6%、5.7%和 6.6%(均 $P < 0.05$),显著低于 N0 的 25.3%(图 3(b)).结合施氮量与穗长、穗宽、穗厚度、穗面积的拟合曲线

(图 S1(e)),高氮区间(N4-N3)穗面积减少(5.3%)主要由穗长和穗宽下降驱动,而低氮区间(N3-N0)穗面积减少(56.5%)主要由穗厚度(贡献率 47.8%)、穗长(36.8%)和穗宽(15.4%)协同调控。

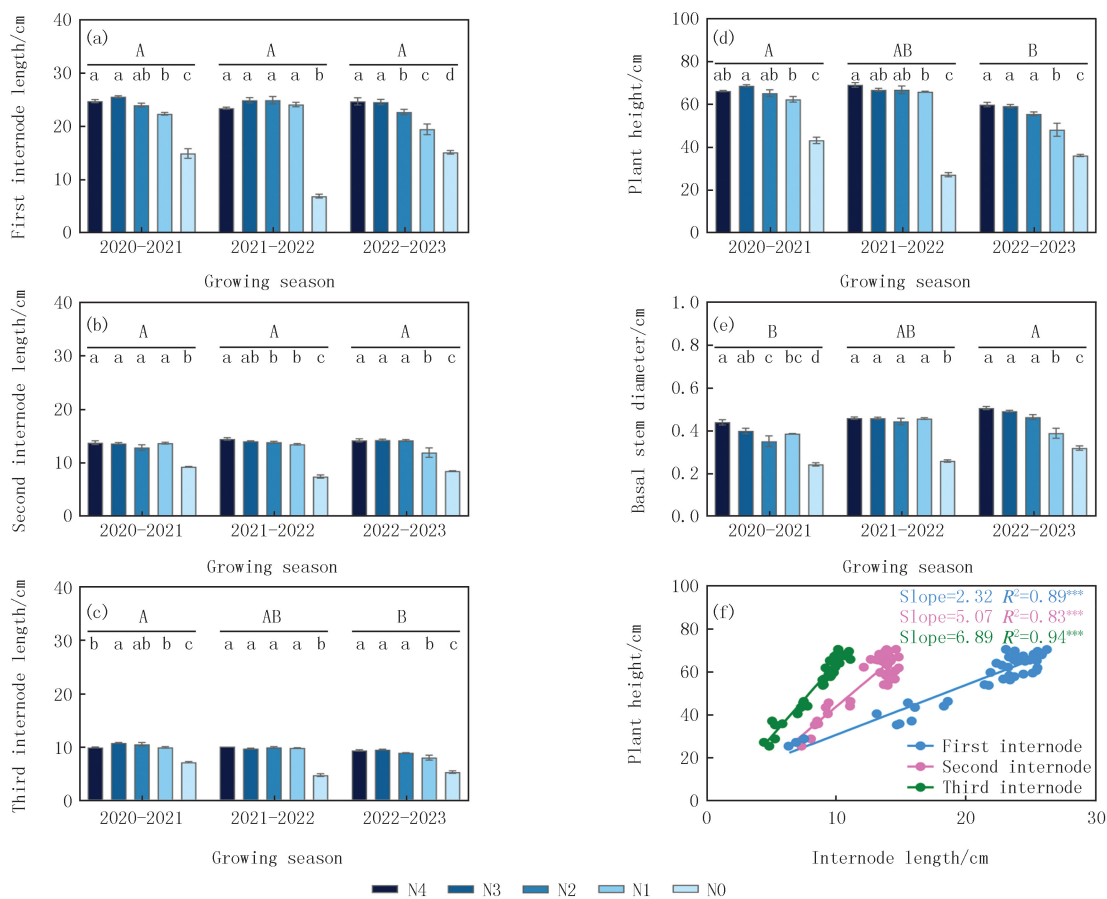


图2 不同氮肥处理下的节间(a-c)、株高(d)、基部节间直径(e)及株高与各节间长度的关系(f)

Fig.2 The internode length, plant height, basal stem diameter under different nitrogen treatments, and the relationship between plant height and internodes length

2.4 叶面积指数与透光率

减量施氮显著降低花后叶面积指数(LAI),同时提高冠层基部透光率($P < 0.05$),但 N3 与 N4 处理间两参数均无显著差异(图 4).如图 4(a)所示,在 2021—2022 年生长季(花后 10 d),N2 与 N1 处理的 LAI 较 N4 分别降低 18.6%和 42.4%,而在 2022—2023 年生长季,N2 与 N1 处理的 LAI 较 N4 分别降低 42.7%和 56.5%(花后 4 d)与 39.0%和 60.5%(花后 15 d).如图 4(b)所示,在 2021—2022 年和 2022—2023 年生长季,N4 处理下冠层基部透光率分别为 2.6%和 3.6%,分别显著低于 N2 处理的 5.4%和 13.2 及 N1 处理的 12.2%和 25.8%。

2.5 籽粒产量与氮肥偏生产力

籽粒产量随施氮量减少呈显著下降趋势($P < 0.05$;图 5(a)).3 个生长季均值表明,N4($9.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与 N3($9.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)产量无显著差异($P > 0.05$).相较 N4,N2、N1、N0 分别减产 19.1%($7.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、50.3%($4.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 87.9%($1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$).表明在总施氮量 $\geq 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2 及以上)时可维持高产潜力.氮肥偏生产力(PFPN)以 N2 处理最高($44.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著高于 N4($32.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 N3($40.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$;图 5(b)).N3 较 N2 施氮量增加 33.3% ($240 \text{ vs. } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),但 PFPN 反降 8.3% ($40.4 \text{ vs. } 44.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$).N2 通过优化冠层结构(显著增加冠层基部透光率),以 19.1%的产量损失换取 25.9%的氮利用效率提升.上述分析表明,减量施氮至 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可实现产量与资源效率的协同优化。

2.6 冠层性状与产量的关系

图 6 为籽粒产量与叶面积指数的 logistic 拟合($R^2 > 0.90$).在 2021—2022 年生长季,当 $LAI < 1.7$ 时,产量增长率为 $1.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot LAI^{-1}$ (渐增阶段),当 $1.7 \leq LAI < 3.4$ 时,增长率达峰值 $3.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot LAI^{-1}$ (快增阶段),当 $3.4 \leq LAI < 5.5$ 时,增长率降至 $1.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot LAI^{-1}$ (缓增阶段),当 $LAI \geq 5.5$ 时,产量进入平

台期(增长率 $<0.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{LAI}^{-1}$)(图 6(a)).在 2022—2023 生长季(花后 4 d),当 $\text{LAI} < 1.6$ 时,增长率 $1.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{LAI}^{-1}$,当 $1.6 \leq \text{LAI} < 3.7$ 时,峰值增长率达 $2.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{LAI}^{-1}$,当 $3.7 \leq \text{LAI} < 6.4$ 时,增长率 $0.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{LAI}^{-1}$,当 $\text{LAI} \geq 6.4$ 时,进入平台期(增长率 $<0.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{LAI}^{-1}$)(图 6(b)).

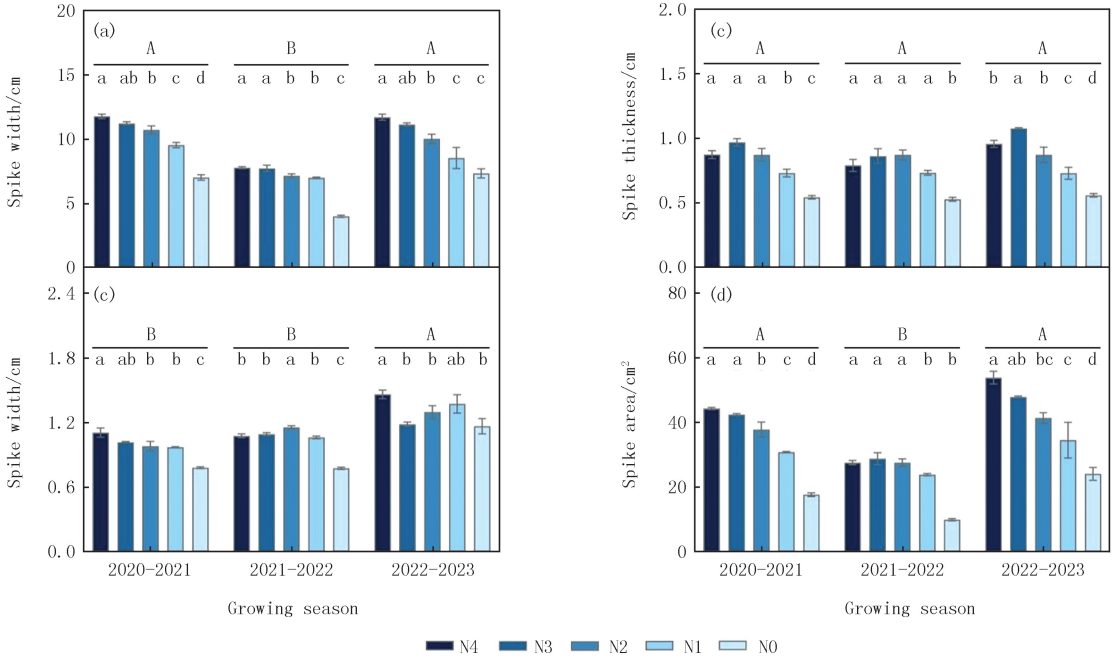
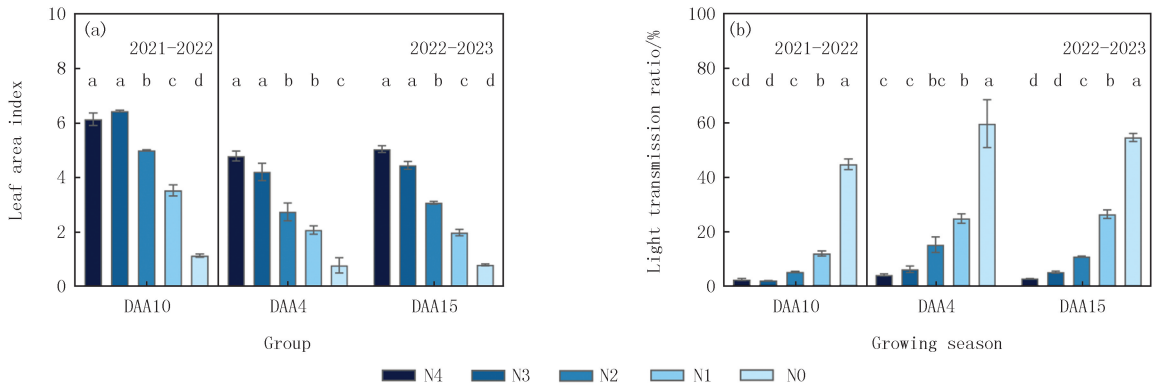


图3 不同氮肥处理下的穗长(a)、穗宽(b)、穗厚度(c)和穗面积(d)

Fig.3 The spike length(a), spike width(b), spike thickness(c) and spike area(d) under different nitrogen treatments



注:DAA为开花后天数.

图4 不同氮肥处理下的叶面积指数和冠层透光率

Fig.4 The leaf area index(a) and light transmission ratio in the canopy(b) under different nitrogen treatments

叶片性状与籽粒产量的相关关系见附录图 S2.可以看出,籽粒产量与各层次叶片性状(长度、宽度、面积)均呈显著正相关关系,且与倒一叶长度、宽度、面积的相关性较强($R \geq 0.78, P < 0.05$).从图 S2(b)可以看出,茎节性状中,株高与籽粒产量的相关性较强($R = 0.88, P < 0.05$),而基部茎节直径与籽粒产量的相关性相对较弱($R = 0.69, P < 0.05$).如图 S2(c)所示,穗部性状中,穗厚度与籽粒产量呈显著正相关($R = 0.69, P < 0.05$),而穗宽与产量的相关没有达显著水平($R = 0.16, P > 0.05$).

3 讨论

3.1 减量施氮对株高-倒伏平衡的调控机制

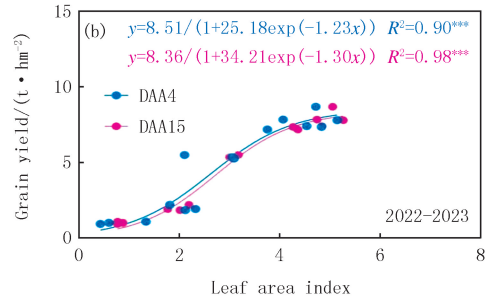
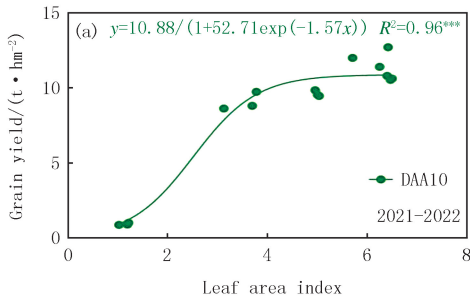
倒伏是制约华北平原小麦生产的重要因素之一.小麦倒伏主要发生于基部节间(尤其第二节间),其风险与株高及茎秆强度显著负相关^[22].研究表明,过量施氮(N4)虽通过提升株高促进干物质积累,显著增加倒

伏隐患。适度减氮至 N2 水平能够维持茎秆机械强度(图 2(e)),这与氮素调控赤霉素合成通路密切相关,过量氮肥(N4)通过上调 *Ga20ox* 基因表达促进赤霉素合成,导致节间过度伸长、胞壁变薄,增加倒伏风险,N2 处理的茎秆稳定性表明,减量施氮可能通过抑制赤霉素信号,协调细胞伸长与次生壁增厚^[22-24]。

3.2 茎节-叶片协同调控与冠层结构优化

增施氮肥通常延长禾谷类作物基部节间而缩短上部节间,改变植株结构稳定性^[22]。水稻研究进一步证实,不合理追氮导致上部节间缩短与叶层配置失衡,降低光合效率^[25]。本研究表明,减氮处理(N2-N3)能够维持上部三节间(倒一节、倒二节和倒三节)长度,有利于维持茎秆结构完整性,保障光合器官的空间配置效率。另外,与 N4 处理相比,N3 处理上三叶叶长/叶宽降幅较小,N2 处理倒一叶与倒二叶叶长显著降低,降幅大于倒三叶(图 1)。本研究中,N2 处理冠层基部透光率显著高于 N4(图 4(b))。表明适度减氮(N2)通过优先压缩倒一叶与倒二叶,促使叶层空间紧凑,提高冠层基部透光率,协同维持上部节间长度,实现形态-功能协同优化。这与水稻氮肥优化中“缩短上三叶改善光分布”的结论较为一致^[25]。

3.3 叶面积指数与增产途径



注:DAA为开花后天数。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

图6 2021—2022年(a)和2022—2023年(b)生长季籽粒产量与叶面积指数的关系

Fig.6 The relationship between grain yield and leaf area index during 2021 to 2022(a) and 2022 to 2023(b) growing seasons

叶面积指数(LAI)是调控小麦籽粒产量的核心参数^[26]。本研究发现,减氮处理(N2)虽通过优化茎叶配置(冠层基部透光率显著提升)改善株型结构,但因 LAI 降低幅度较大(图 4(a)),导致产量较 N4 下降近 20%。这与徐恒永等^[27]提出的“合理 LAI 是维持群体光合能力的基础”结论一致。另外,与 2022—2023 年生长季相比,2021—2022 年生长季较高的籽粒产量(8.47 vs. 4.76 t · hm⁻²)主要得益于其较高的叶面积指数和单位面积穗数。2022—2023 年生长季单位面积穗数较 2021—2022 年生长季下降 20.5%,直接导致 LAI 与产量同步降低。这表明在减氮背景下,通过栽培措施(如增密播种)提升穗数,促进花后叶面积指数提高,补偿减氮的光合物质生产损失,可能是突破产量瓶颈的关键途径。

3.4 减量施氮的生态与生产权衡

当前农户施氮量(平均 249 kg · hm⁻²)远超本研究推荐量(180 kg · hm⁻²),且 N3(240 kg · hm⁻²)与 N4(300 kg · hm⁻²)的产量无统计学差异(图 5)。这证实减氮 30%~40%不会显著牺牲产量,但可大幅降低环境风险。结合前人研究,过量施氮引发的氮素损失^[28]与温室气体排放^[9]在华北平原已构成严重生态威胁。因此,N2 处理(180 kg · hm⁻²)通过塑造合理冠层结构(紧凑上位叶+高透光率+稳健茎秆),可为增产增效与环境保护的双赢目标提供可行路径。

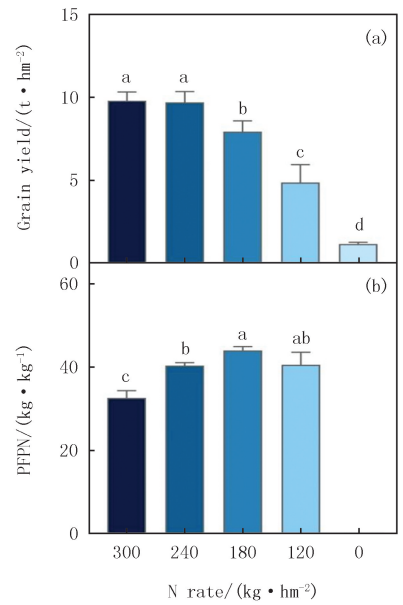


图5 不同氮肥处理下的籽粒产量(a)和氮肥偏生产力(b)(2020—2023年生长季均值)

Fig.5 The grain yield(a) and partial factor productivity of nitrogen(b) under different nitrogen treatments(mean of the growing season from 2020 to 2023)

4 结 论

本研究通过3年田间定位试验证实,减量施氮至 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (底施 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +拔节期追施 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),通过三重协同机制优化华北平原冬小麦生产:一是冠层结构重塑,优先压缩倒一叶与倒二叶(叶长降幅 $7.8\%\sim 12.4\%$),形成紧凑株型,显著提高冠层基部透光率;二是茎秆抗逆性维持:上部节间长度变化小于 4% 且基部茎秆直径稳定,保障抗倒伏能力;三是产量-效率协同提升:籽粒产量($7.9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)较常规施氮(N4)仅降 19.1% ,但氮肥偏生产力(PFPN)达 $44.1\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (提升 25.9%)。综上,底施纯氮 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 结合拔节期追施 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可作为华北平原冬小麦减氮增效的优化模式。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.06.05.0002)。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局.国家统计局关于2024年粮食产量数据的公告[R/OL].(2024-12-13).[2025-03-11].2025.https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202412/content_6992479.htm.
- [2] 中华人民共和国国家统计局.国家统计局关于2023年粮食产量数据的公告[R/OL].(2023-12-11).[2025-03-11].https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202312/t20231211_1945417.html.
- [3] TIAN D,ZHANG Y Y,MU Y J,et al.Effect of N fertilizer types on N_2O and NO emissions under drip fertigation from an agricultural field in the North China Plain[J].*Science of the Total Environment*,2020,715:136903.
- [4] 杜文婷,雷肖肖,卢慧宇,等.氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响[J].*中国农业科学*,2022,55(24):4863-4878.
DU W T,LEI X X,LU H Y,et al.Effect of nitrogen fertilizer reduction on the yield of three major grain crops in China[J].*Scientia Agricultura Sinica*,2022,55(24):4863-4878.
- [5] WU P,WU Q,HUANG H,et al.Global meta-analysis and three-year field experiment shows that deep placement of fertilizer can enhance crop productivity and decrease gaseous nitrogen losses[J].*Field Crops Research*,2024,307:109263.
- [6] XU S,WEI Y C,LAGHARI A H,et al.Modelling effect of different irrigation methods on spring maize yield,water and nitrogen use efficiencies in the North China Plain[J].*Mathematical Biosciences and Engineering*,2021,18(6):9651-9668.
- [7] 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.
- [8] MENG F L,WANG M R,STROKAL M,et al.Nitrogen losses from food production in the North China Plain:a case study for Quzhou [J].*Science of the Total Environment*,2022,816:151557.
- [9] WANG C,SHEN Y,FANG X T,et al.Reducing soil nitrogen losses from fertilizer use in global maize and wheat production[J].*Nature Geoscience*,2024,17(10):1008-1015.
- [10] GU B J,ZHANG L,VAN DINGENEN R,et al.Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating $\text{PM}_{2.5}$ air pollution[J].*Science*,2021,374(6568):758-762.
- [11] CUI Z L,ZHANG F S,CHEN X P,et al.On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test[J].*Field Crops Research*,2008,105(1/2):48-55.
- [12] SUN G Y,DONG Y J,YIN W J,et al.A new core-inhibitor coated urea that increases wheat yield and nitrogen use efficiency by reducing nitrogen loss and regulating soil nitrogen supply[J].*Field Crops Research*,2025,333:110080.
- [13] SHI X L,CUI F,HAN X Y,et al.Comparative genomic and transcriptomic analyses uncover the molecular basis of high nitrogen-use efficiency in the wheat cultivar Kenong 9204[J].*Molecular Plant*,2022,15(9):1440-1456.
- [14] OUYANG W J,YIN X Y,YANG J C,et al.Roles of canopy architecture and nitrogen distribution in the better performance of an aerobic than a lowland rice cultivar under water deficit[J].*Field Crops Research*,2021,271:108257.
- [15] FU Y H,DAI J Y,YANG H,et al.Newer wheat cultivars achieved greater yield and water productivity through root and canopy synergies in the North China Plain[J].*Field Crops Research*,2025,328:109880.
- [16] 徐春燕,张倩,袁一鸣,等.有机肥替代化学氮肥对冬小麦-夏玉米产量和土壤肥力的影响[J].*河南农业大学学报*,2025,59(1):79-90.
XU C Y,ZHANG Q,YUN Y M,et al.Effects of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on winter wheat-summer maize yield and soil fertility[J].*Journal of Henan Agricultural University*,2025,59(1):79-90.
- [17] 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):164-174.
ZHANG W J,JIANG D G,HUANG Z L,et al.Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure,yield and quality of wheat after rice[J].*Journal of Triticeae Crops*,2018,38(2):164-174.

- [18] 张皖玉,张志勇,张潇斌,等.不同施氮量对小麦-玉米轮作体系氮素利用的影响[J].河南农业大学学报,2024,58(4):562-572.
ZHANG W Y,ZHANG Z Y,ZHANG X B,et al.Effects of different nitrogen application rates on nitrogen utilization in wheat-maize rotation system[J].Journal of Henan Agricultural University,2024,58(4):562-572.
- [19] 丁永刚,陈欢,曹承富,等.高光效小麦群体提高氮素吸收利用和产量的机理[J].植物营养与肥料学报,2024,30(1):27-35.
DING Y G,CHEN H,CAO C F,et al.Mechanism of improving nitrogen absorption and utilization and yield of high photosynthetic efficiency wheat population[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2024,30(1):27-35.
- [20] 裘昭峰,翟立业.小麦穗和芒表面积的估测[J].作物学报,1985,11(2):138.
- [21] TEARE I D,PETERSON C J.Surface area of chlorophyll-containing tissue on the inflorescence of *Triticum aestivum* L.1[J].Crop Science,1971,11(5):627-628.
- [22] ZHANG H J,LI T,LIU H W,et al.Genetic progress in stem lodging resistance of the dominant wheat cultivars adapted to Yellow-Huai River Valleys Winter Wheat Zone in China since 1964[J].Journal of Integrative Agriculture,2020,19(2):438-448.
- [23] JONES R L,KAUFMAN P B.The role of gibberellins in plant cell elongation[J].Critical Reviews in Plant Sciences,1983,1(1):23-47.
- [24] LIU T Q,LI D P,XIE Z C,et al.VRN1 regulates heading and plant height in wheat by activating gibberellin biosynthesis[J].Plant Communications,2025,6(7):101325.
- [25] 曾勇军,吕伟生,潘晓华,等.氮肥追施方法和追用时期对超级早稻株型及物质生产的影响[J].作物学报,2014,40(11):2008-2015.
ZENG Y J,LYU W S,PAN X H,et al.Effects of nitrogen topdressing method and time on plant type and dry mass production of super early-rice[J].Acta Agronomica Sinica,2014,40(11):2008-2015.
- [26] 宋一凡,武紫君,付凯霞,等.豫东南砂姜黑土冬小麦种植区有机肥和无机氮配施组合模式选择[J].河南农业大学学报,2025,59(1):38-48.
SONG Y F,WU Z J,FU K X,et al.Selection of combined application mode of organic fertilizer and inorganic nitrogen in winter wheat planting area of Shajiang black soil in southeastern Henan Province[J].Journal of Henan Agricultural University,2025,59(1):38-48.
- [27] 徐恒永,赵君实.高产冬小麦的冠层光合能力及不同器官的贡献[J].作物学报,1995,21(2):204-209.
XU H Y,ZHAO J S.Canopy photosynthetic capacity of high-yield winter wheat and contribution of different organs[J].Acta Agronomica Sinica,1995,21(2):204-209.
- [28] 方保停,李友军,闫广轩,等.耕作方式对旱作区麦-玉轮作体系小麦产量、氮素利用和土壤硝态氮残留的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(5):1-9.
FANG B T,LI Y J,YAN G X,et al.Effects of tillage methods on wheat yield,N utilization and soil nitrate-N residue in dryland wheat-maize rotation system[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(5):1-9.

Canopy structural adaptation and nitrogen efficiency in winter wheat under reduced nitrogen input in the North China Plain

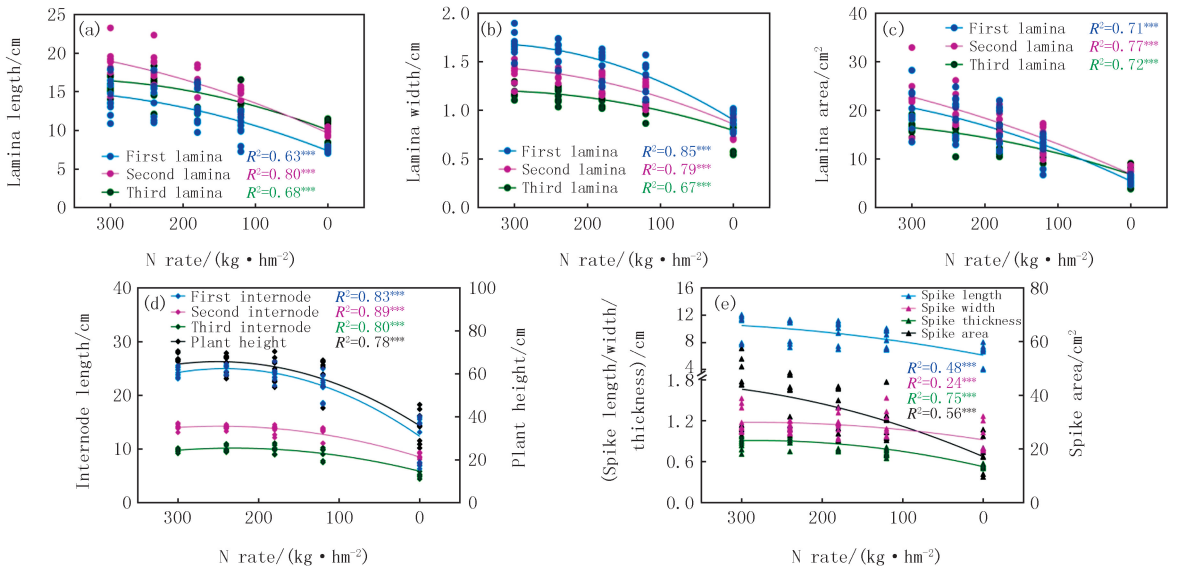
Huang Jianxin, Ma Jingli, Han Maolin, Chen Peng, Wang Xiaojie, Hao Baozhen, Chen Leishan

(School of Biological Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: To address the dual challenges of yield stagnation and excessive nitrogen(N) fertilization in winter wheat production across the North China Plain, a three-year field positioning experiment was conducted with five N treatments. This study systematically elucidated the regulatory mechanisms of N reduction on canopy architecture, yield formation, and nitrogen utilize. The results indicated that reduced nitrogen application significantly compressed the upper canopy leaves, optimizing canopy structure, among which penultimate leaves exhibited the highest sensitivity to nitrogen availability. For stem traits, N2 maintained upper internode length and basal stem diameter while reducing plant height by only 3.9%. Regarding light distribution, although post-anthesis leaf area index(LAI) decreased by 18.6% to 42.7%, while the light transmittance at the canopy base was increased by 1~3 folds. Grain yield followed a logistic growth model with LAI, and the yield under N2 treatment ($7.9 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) was 19.1% lower than that under N4 treatment, while the partial factor productivity of nitrogen(PFPN) was significantly increased to $44.1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Conclusively, reducing N input to $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ optimizes canopy light distribution and enhances structural robustness of stems and spikes, achieving resource-efficient utilization with controlled yield penalty. This strategy serves as an effective N management regime for environmentally sustainable winter wheat production in the North China Plain.

Keywords: winter wheat; nitrogen fertilization; canopy architecture; grain yield; partial factor productivity of nitrogen

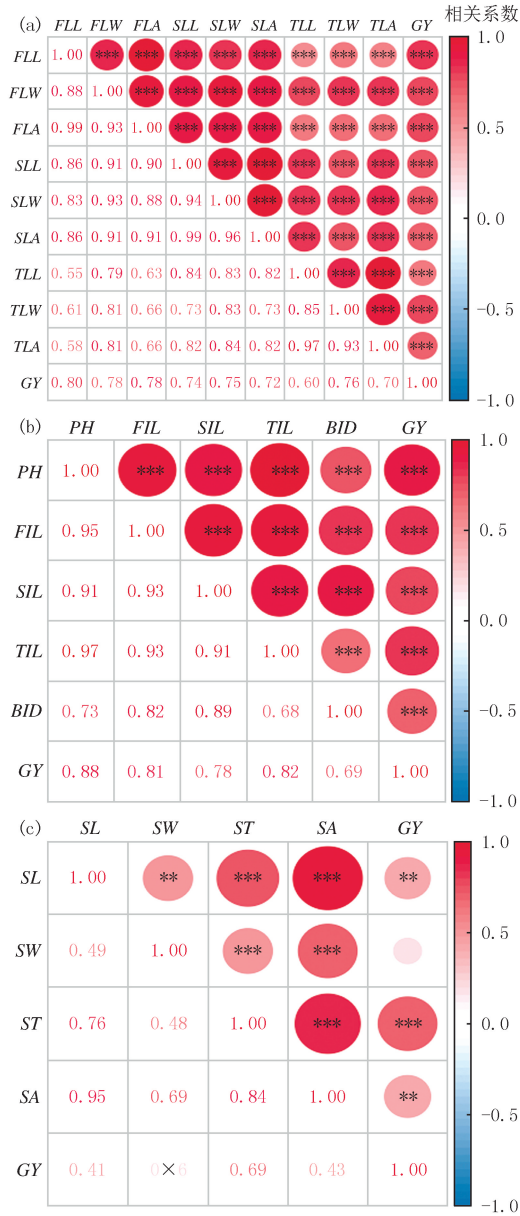
附录



注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

图S1 施氮量与叶片性状(a-c)、茎节性状(d)和穗部性状(e)的关系

Fig.S1 The relationship between N rate and leaf traits(a-c), stem traits(d), spike traits(e)



注:*GY*为籽粒产量;*FLL*、*FLW*和*FLA*分别为倒一叶的叶长、叶宽和叶面积;*SLL*、*SLW*和*SLA*分别为倒二叶的叶长、叶宽和叶面积;*TLL*、*TLW*和*TLA*分别为倒三叶的叶长、叶宽和叶面积;*PH*为株高;*FIL*、*SIL*和*TIL*分别为倒一节、倒二节和倒三节长度;*BID*为基部节间直观;*SL*、*SW*、*ST*和*SA*分别为穗长、穗宽、穗厚度和穗面积。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

图S2 籽粒产量与叶片性状(a)、茎节性状(b)和穗部性状(c)的关系
Fig. S2 The relationship between grain yield and leaf traits(a), stem traits(b), spike traits(c)