

氮肥减施对干旱区春小麦旗叶生理特性、 氮肥利用效率及土壤养分的影响

龚成毓^{1,2}, 胡雨彤^{1,2,3}, 张少民⁴, 郭亮^{1,2}, 鞠成琦^{1,2}, 杨晓燕^{1,2}, 韩晨阳^{1,2}, 寇天乐^{1,2}

(1. 新疆农业大学资源与环境学院,新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室,新疆乌鲁木齐 830052;
3. 新疆绿色种植业工程中心,新疆乌鲁木齐 830052; 4. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业资源与环境研究所,新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:为探究减氮对春小麦旗叶生理特性、土壤养分含量及产量的调控规律,为干旱区氮肥优化提供数据支持。以小麦品种粮春 1354 为材料,设置 4 个施氮水平(N0:0 kg/hm²;N1:300 kg/hm²;N2:270 kg/hm²;N3:240 kg/hm²),系统分析减氮对春小麦光合特性、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、土壤养分含量及产量的影响。结果表明,(1)减氮 10%(N2 处理)显著改善花后 15 d 旗叶光合性能,其叶绿素 a 含量、净光合速率和蒸腾速率较 N0 处理分别提高 91.14%、148.23% 和 70.86%,胞间 CO₂ 浓度较 N0 处理降低 55.94%。抗氧化酶活性分析结果证实,施氮处理提高了叶片过氧化物酶活性,N1 处理最高,较 N0 处理提高了 284.51%,同时 N2 处理的超氧化物歧化酶活性较 N0 提升 62.76%,丙二醛含量降低 14.25%,可溶性蛋白、可溶性糖含量在 N1、N2 处理下处于较高水平。(2)土壤养分方面,在 N1、N2 处理下,硝态氮含量显著增加,铵态氮含量虽然有所提高,但差异未达显著水平,其中 N2 处理的硝态氮分别较 N1、N3、N0 处理显著高 122.70%、63.37%、218.20%。速效钾、速效磷含量在 N2 处理和 N3 处理间无显著差异,但 N3 处理的速效磷含量较 N0 显著降低 28.91%,说明施氮影响小麦生长和土壤养分分布。(3)产量构成方面,N2 处理通过协同提高穗粒数、有效穗数和千粒重,使产量较 N0 处理提升 64.31%,氮肥农学利用率较 N1、N3 处理分别高 117.64%、56.71%。(4)相关性分析结果表明,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、硝态氮含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量与产量呈极显著正相关,产量与可溶性糖含量和超氧化物歧化酶活性呈显著正相关,而胞间 CO₂ 浓度、速效钾含量和丙二醛含量则与产量呈负相关。综合分析表明,270 kg/hm² 的施氮量通过光合-抗氧化协同调控维持产量稳定,可为干旱区春小麦氮肥优化施用提供基础数据支持。

关键词:春小麦;减氮;生理特性;土壤养分;产量

中图分类号:S512.1⁺20.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)09-0100-08

春小麦(*Triticum aestivum* L.)作为我国北方旱作区的粮食作物,其产量和品质直接关乎粮食安全,发展小麦生产对于确保国家粮食安全具有重要战略意义^[1-2]。氮肥作为第一大元素,在小麦生长过程中发挥着重要作用。氮元素在植物体中不仅是蛋白质、叶绿素以及部分激素的重要组成成分,还显著调控着植物的生长过程、光合效能及产量构成^[3-4]。然而,长期以来,我国春小麦主产区普遍存在氮肥施用量偏高、利用率低的问题,导致生产成

本增加、氮素流失加剧,并引发土壤退化、水体富营养化及温室气体排放等环境问题,已成为制约区域农业可持续发展的突出矛盾,特别是在土壤速效养分的管理上,速效氮磷钾和硝态氮、铵态氮的施用失衡,加剧了土壤养分的不均衡分布,进而影响小麦的正常生长与产量提升^[5-7]。因此,探索春小麦的合理施氮模式,明确减氮对小麦生长和生理特性的影响,对于优化氮肥管理、提高氮肥利用率和实现高产高效栽培具有重要意义。

近年来,国家提出在保障粮食安全的前提下推广化肥减量增效技术,以提高氮肥利用率,实现农业可持续发展。土壤中的速效养分对小麦生长至关重要。速效氮磷钾可以促进植株生长和根系发育,硝态氮有助于光合作用,而铵态氮可提高氮素吸收效率并减少挥发损失^[5]。目前,已有研究探讨了氮肥减施对小麦光合特性、籽粒产量及品质的影

收稿日期:2025-06-04

基金项目:新疆土壤与植物生态过程重点实验室开放课题(编号:23XJTRZW09_24XJTRZW16)。

作者简介:龚成毓(1997—),女,云南镇雄人,硕士研究生,主要从事土壤与植物营养相关的研究。E-mail:1489617882@qq.com。

通信作者:胡雨彤,博士,副教授,硕士生导师,主要从事肥料资源高效利用研究。E-mail:hyt_533@163.com。

响,但研究结论并不统一。蔡瑞国等研究发现,适宜的氮素供应有助于维持较高的光合速率和抗氧化酶活性,延缓叶片衰老,提高产量^[8];易媛等的研究表明,适当减少氮肥施用量(从 270 kg/hm² 降至 225 kg/hm²)对籽粒产量影响不显著,但可提高氮肥偏生产力和氮素生理利用效率^[9];赵鹏等的研究表明,适量的氮肥施用可以提高光合效率和籽粒产量,但过量施用氮肥可能抑制光合作用效率,并降低产量^[10]。值得注意的是,西北干旱区小麦氮肥利用率不足 35%,显著低于全国平均水平,亟需探索适应区域生态特征的氮肥优化管理模式^[11]。基于此,本研究针对干旱区生态特点设置不同施氮水平,系统解析减氮处理对春小麦旗叶生理特性(光合特性、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量)、土壤养分含量和产量的影响,以期对干旱区春小麦的氮肥管理提供基础理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究于 2024 年在新疆农业大学陆港校区(43°93'N,87°35'E,海拔 593 m)开展,试验区气候类型为温带大陆性干旱气候,供试土壤为灰漠土^[12],含有机质 11.24 g/kg、全氮 0.79 g/kg、有效磷 13.12 mg/kg、速效钾 241.33 mg/kg、硝态氮 8.10 mg/kg、铵态氮 2.10 mg/kg,pH 值为 8.2。

1.2 供试材料

供试小麦品种为粮春 1354,由新疆九圣禾种业股份有限公司提供。本试验所用肥料包括尿素(含氮 46%)、重过磷酸钙(含五氧化二磷 46%)、硫酸钾(含氧化钾 50%),分别由兖矿新疆煤化工有限公司、云南磷聚力农业科技有限公司、格尔木钾元素矿业有限公司提供。

1.3 试验设计

试验于 2024 年 4 月中旬开展。设 4 个氮肥施用量处理,分别为 0 kg/hm² (N0)、300 kg/hm² (N1)、270 kg/hm² (N2)、240 kg/hm² (N3),采用随机区组设计,重复 3 次,共 12 个小区,小区面积 30 m²,各小区间留有 1 m 隔离区,行距 15 cm^[13]。小麦于 2024 年 4 月 25 日播种,3 叶期定苗,播种密度为 480 万株/hm²,于当年的 7 月 23 日收获。播种前,将重过磷酸钙(P₂O₅ 含量 46%,施用量 128 kg/hm²)作为基肥一次性施入。氮肥按基肥 30%、苗期 30%、拔节期 30%、花期 10%的比例分期

施用。硫酸钾(K₂O 含量 50%,施用量 75 kg/hm²)按苗期 50%、开花期 25%、灌浆期 25%的比例分期施用。其他管理措施同农户常规大田管理^[14]。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 春小麦叶片生理特性的测定

1.4.1.1 旗叶光合特性的测定 在花后 10、15、20 d,每个小区选取 4 张具有代表性的旗叶,在晴天 08:30—11:30 采用美制便携式光合仪(CIRAS-2)测定其光合特性[净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)]^[4]。

在光合参数测定的同时采集小麦旗叶,带回室内采用 95% 乙醇避光浸提法进行叶绿素含量的测定。根据以下公式分别计算出叶绿素 a(Chla)和叶绿素 b(Chlb)的浓度^[15-16]。

$$C_a = 12.71D_{663\text{ nm}} - 2.59D_{645\text{ nm}}; \quad (1)$$

$$C_b = 22.88D_{645\text{ nm}} - 4.67D_{663\text{ nm}}; \quad (2)$$

$$\text{色素含量} = (C \times V \times DF) / m。 \quad (3)$$

式中: C_a 、 C_b 分别为叶绿素 a、叶绿素 b 的浓度,mg/L; C 表示待测色素的质量浓度,mg/L; V 为浸提液体积,L; DF 为稀释倍数; m 代表样品干重,g。植物组织中各色素含量可按公式(3)计算^[16]。

1.4.1.2 旗叶抗氧化关键酶活性和渗透调节物质含量测定 于盛花期取生长一致且同日开花的旗叶,经液氮速冻后,保存于 -80 °C 超低温冰箱,用于抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的测定,其中超氧化物歧化酶(SOD)活性通过氮蓝四唑法定量分析,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法显色技术检测,可溶性蛋白(SP)含量使用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定,可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法测定^[17-19]。

1.4.2 土壤速效养分的测定 在小麦成熟期对土壤速效养分进行测定,其中碱解氮含量以碱解蒸馏法测定;硝态氮、铵态氮含量经氯化钾浸提后,采用连续流动分析仪(AA3)测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法测定;速效钾含量则使用醋酸铵浸提-火焰光度法测定。各项测定方法均参照鲍士旦《土壤农化分析》^[20]的规范执行。

1.4.3 产量及其构成因素测定 在小麦成熟期每个小区选取 3 m² 样区,调查单位面积穗数,采收后风干、脱粒称重,测定千粒重,计算籽粒产量;在采收前每个小区各随机选取 50 个具有代表性的单茎,测定穗粒数。

1.4.4 氮素利用效率 按照以下公式计算氮肥利用效率:

氮肥农学利用效率 = (施氮区籽粒产量 - 氮空白区籽粒产量) / 施氮量^[21];

氮肥偏生产力 = 施氮区籽粒产量 / 施氮量^[22]。

1.5 数据处理

数据经 Excel 预处理后,采用 SPSS 23 进行方差分析(ANOVA)及事后检验(α = 0.05),用 Origin 2024 软件绘图。不同减氮水平下春小麦叶片生理特征、氮肥利用效率及土壤养分含量与产量的相关性分析(Spearman 相关)在 R4.4.3 中使用 linkET 包完成。

2 结果与分析

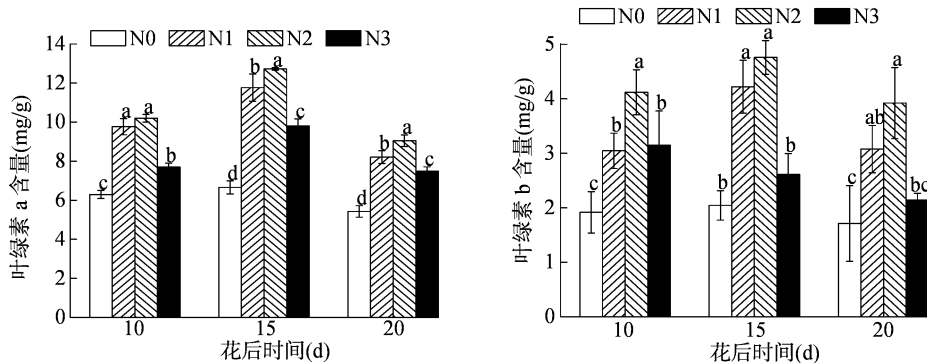
2.1 不同减氮水平对春小麦旗叶生理特性的影响

2.1.1 不同减氮水平对春小麦旗叶光合特性的影响

由图 1 可知,不同施氮处理显著影响春小麦花后关键生理指标。叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均在花后 15 d 达到峰值,其中 N2 处理(270 kg/hm²)的含量最高,较 CK(N0)分别显著高出 91.14% 和

132.20%,且显著高于 N3 处理;N3 处理的叶绿素 a 含量显著低于 N1、N2 处理,叶绿素 b 含量差异相似,虽高于 N0 处理但差异不显著。

在光合生理指标方面,花后 10、15 d,N2 处理的净光合速率均显著高于其他处理(如 15 d 时比 N0 处理高 148.23%),N0 则显著最低;花后 20 d,N1 处理与 N2 处理的净光合速率无显著差异,但均显著高于 N0、N3 处理(图 2-a)。N2 处理的气孔导度在各时间点均显著最高,并于花后 15 d 达到顶峰,较 N0、N1 处理分别高 129.21%、21.66%,N0 处理始终显著最低(图 2-b)。蒸腾速率的变化趋势与气孔导度相同,N2 处理在花后 15 d 达最高值,N0 处理最低,N2 较 N0 处理显著提高 70.86%,花后 10 d N1 和 N2 处理的蒸腾速率显著高于 N0 处理(图 2-c)。胞间 CO₂ 浓度则总体随施氮量增加呈先降后升趋势,花后 15 d N2 处理较 N0 降低 55.94%。各处理旗叶胞间 CO₂ 浓度平均水平表现为 N0 处理 > N3 处理 > N1 处理 > N2 处理,CK 于花后 10 d 达峰值;此时 N1、N2、N3 处理分别较 N0 处理显著低 28.84%、57.16%、30.85%(图 2-d)。



柱上不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著(P<0.05), 图 2 至图 5 同

图 1 不同减氮水平对春小麦旗叶叶绿素的影响

2.1.2 不同减氮水平对春小麦旗叶抗氧化酶活性

及渗透调节物质含量的影响 由图 3 和图 4 可知,不同减氮水平显著影响春小麦旗叶的抗氧化酶活性及渗透调节物质含量。小麦旗叶过氧化物酶活性随氮肥施用水平的增加呈现逐渐上升的趋势,N1 处理最高,各施氮处理(N1、N2、N3)下过氧化物酶活性分别较 N0 处理显著提高 284.53%、265.33%、154.09%(图 3-a)。叶片超氧化物歧化酶活性在 N2 处理下达到最大值,且显著高于 N0 处理(图 3-b)。反映膜脂过氧化程度的丙二醛含量在不同处理下的变化趋势表现为 N0 处理 > N3 处理 > N2 处理 > N1 处理,相较于 N0 处理,N1、N2 处理下丙二

醛含量分别显著降低 39.44%、14.25%(图 3-c)。

在渗透调节物质方面,小麦叶片可溶性糖含量在 N2 处理下达到峰值,较 N0 处理显著提高 102.45%(图 4-a);而可溶性蛋白质含量则在 N1 处理下达到最大值,较 N0 处理显著提高 366.67%(图 4-b)。

2.2 不同减氮水平对春小麦成熟期土壤养分的影响

由图 5 可知,作物成熟期不同氮肥水平处理显著影响土壤关键养分的有效性。铵态氮含量在 N1 处理下最高,较 N0 处理显著增加 96.58%;N2 处理的铵态氮含量略低于 N1 处理,但差异不显著,也高于 N0 处理;N3 处理的铵态氮含量与 N1 处理相近,也显著高于 N0 处理。硝态氮含量随施氮量增加呈

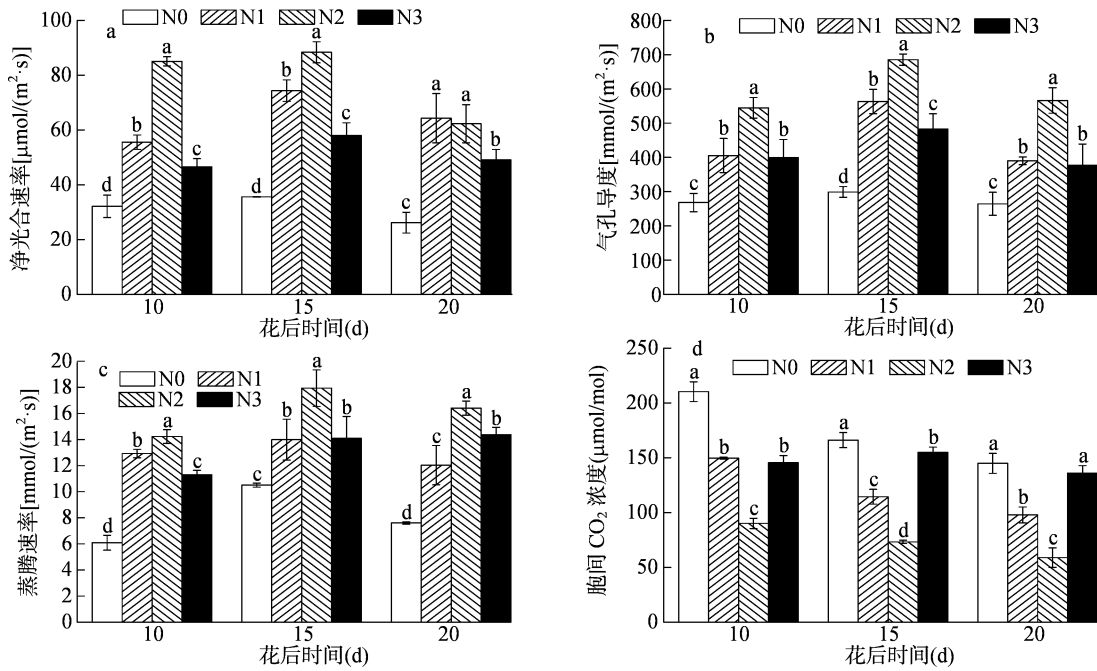


图2 不同减氮水平对春小麦旗叶光合指标的影响

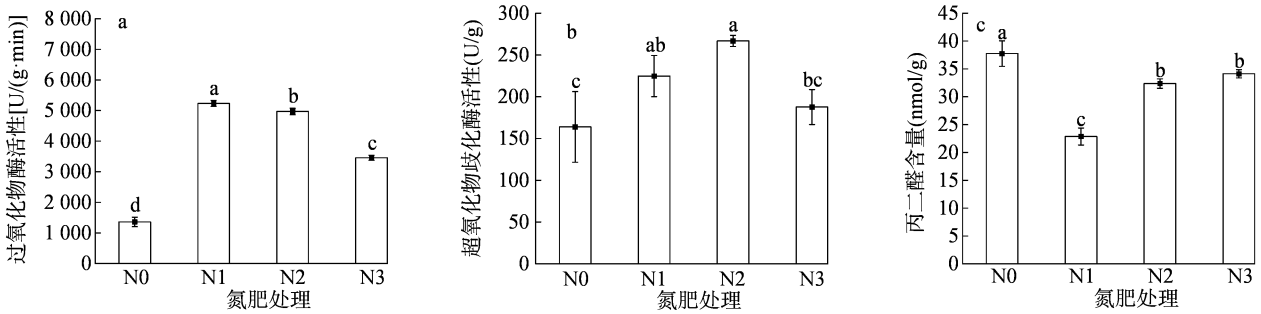


图3 不同减氮水平对春小麦抗氧化酶活性的影响

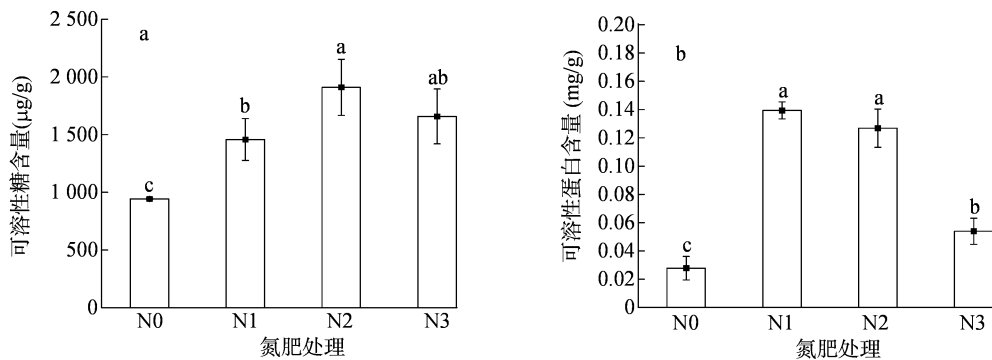


图4 不同减氮水平对春小麦渗透调节物质的影响

先增后降的趋势,以 N2 处理最高,较 N3、N1、N0 分别显著提高 63.37%、122.70%、218.20%;N1、N2、N3 处理之间的硝态氮含量差异显著,且均显著高于 N0 处理。各氮肥处理间速效钾含量无显著差异,表明氮肥对其影响较小。N3 处理的速效磷含量较 N0 处理显著降低 28.91%。碱解氮含量呈单峰变化趋

势,在 N2 处理下达峰值, N1 处理与 N0 处理差异不显著, N3 处理较 N2 处理显著降低 48.09%。

2.3 不同减氮水平对春小麦产量和氮肥利用效率的影响

由表 1 可知,不同氮肥处理对春小麦的有效穗数、穗粒数、千粒重、产量及肥料利用效率均产生显

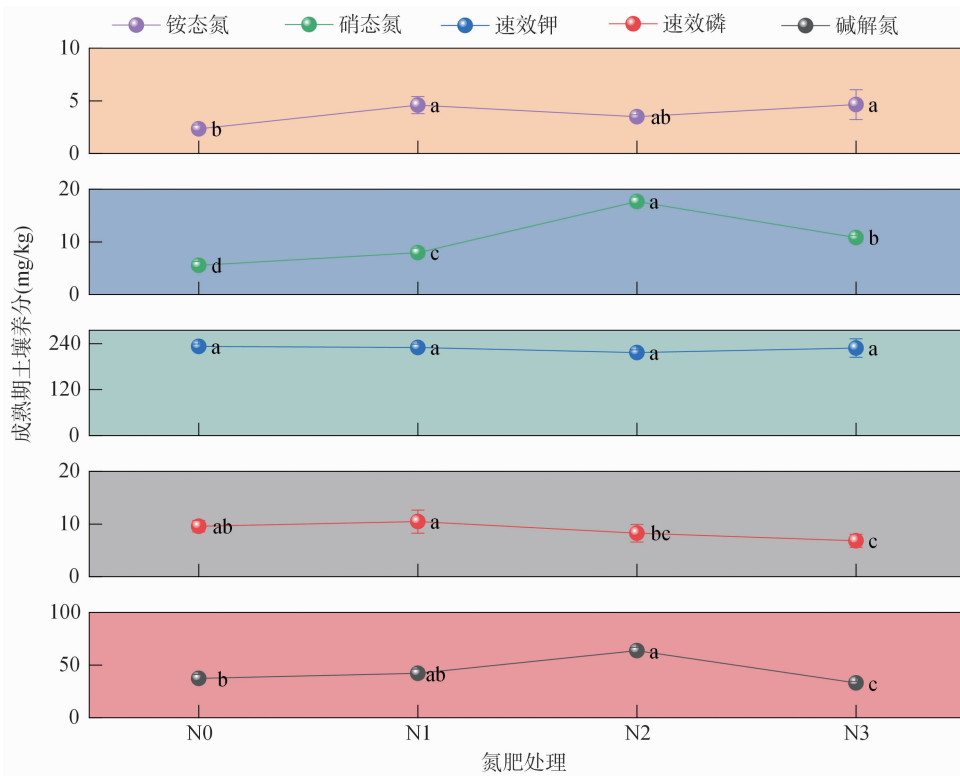


图5 不同减氮水平对春小麦成熟期土壤养分的影响

表 1 不同减氮水平对春小麦产量及肥料利用效率的影响

处理	穗粒数 (粒/穗)	有效穗数 (万穗/hm ²)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	氮肥农学 利用效率 (kg/kg)	氮肥偏 生产力 (kg/kg)
N1	64.67b	223.00c	42.00ab	6 055.15b	4.99c	20.19c
N2	67.33a	252.33a	44.00a	7 492.17a	10.86a	27.75a
N3	63.00ab	236.67b	41.67b	6 222.95b	6.93b	25.93b
N0	59.00c	200.00d	38.67c	4 559.79c		

注:同列数据后不同小写字母表示不同施氮处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

著影响。与不施氮处理相比,增施氮肥后春小麦的穗粒数、有效穗数及千粒重均有不同程度的提高,使籽粒产量明显提高,其中 N2 处理各项指标均显著高于 N0 处理,N1 和 N3 处理则在部分指标上显著提高。具体而言,与 N0 处理相比,N2 处理的穗粒数、有效穗数、千粒重和产量分别提升 14.12%、26.17%、13.78% 和 64.31%,且差异均达显著水平。在氮肥利用效率方面,N2 处理的氮肥农学利用效率最高,较 N1 处理显著提高 117.64%,较 N3 处理提高 56.71%,但差异不显著;N2 处理的氮肥偏生产力同样优于其他处理,与 N3 处理无显著差异,但显著高于 N1 处理。

2.4 不同减氮水平下春小麦叶片生理特征、土壤养分与产量相关性分析

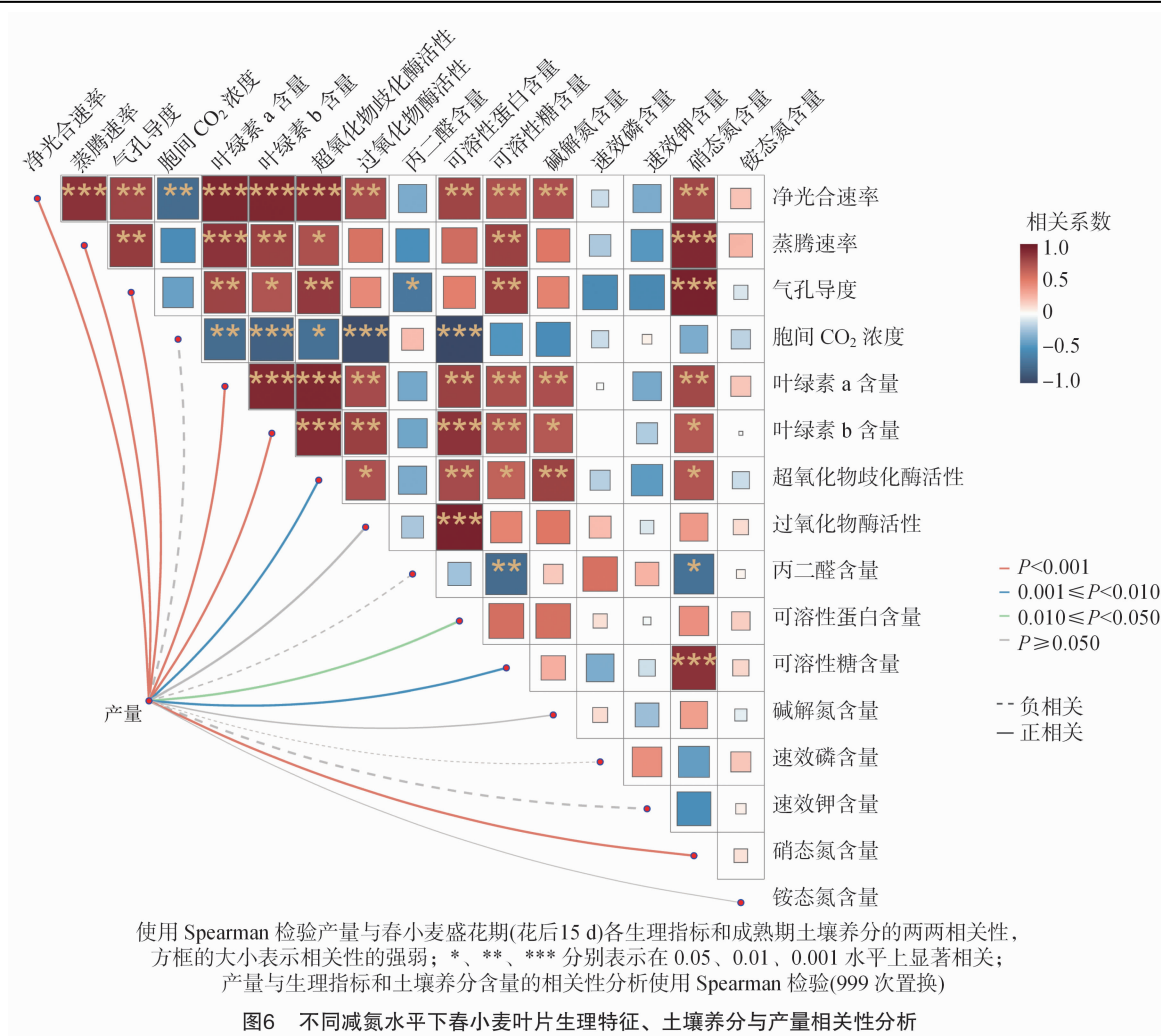
由图 6 可知,在不同减氮水平下,春小麦产量与

多项叶片生理特性及土壤养分指标存在密切关联。Spearman 分析结果显示,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、硝态氮含量与产量呈极显著正相关($P < 0.001$),可溶性蛋白、可溶性糖含量和超氧化物歧化酶活性与产量呈显著正相关($P < 0.05$);相反,与胞间 CO₂ 浓度、速效钾含量、速效磷含量、丙二醛含量呈负相关;与过氧化物酶活性、碱解氮含量、铵态氮含量之间的相关性未达显著水平($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同减氮水平对春小麦叶片生理特性的影响

光合作用是作物生长和产量形成的核心过程,而氮素供应是影响光合作用和叶绿素含量的关键因素^[3]。已有研究表明,产量与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量均呈极显著正相关,该规律与小麦旗叶中叶绿素含量及光合性能随施氮量增加而增强的趋势相吻合;然而,当施氮量超过适宜水平时,可能引发负向调控作用,从而使叶绿素积累与光合能力下降或趋于稳定^[23-24]。此外,马静丽等研究指出,适量减少氮肥施用有助于优化叶片的受光环境,从而提高冠层的光合速率^[25]。在本研究中,与对照组相比,施氮量



为 270 kg/hm^2 时能显著提高春小麦旗叶叶片中光合色素的含量,尤其在花后 15 d,叶绿素 a 对不同氮肥水平的响应比叶绿素 b 更为显著。值得注意的是, N_2 处理在花后 15 d 的净光合速率较 CK 提升 148.23%,且胞间 CO_2 浓度较 CK 显著降低 55.94%,暗示其光合优势不仅源于气孔导度的提升,可能与叶肉细胞羧化效率改善等非气孔因素有关。这一现象符合 Farquhar 模型中“高光合能力驱动胞间 CO_2 浓度下降”的代谢调控规律且与郑天翔等的研究结果^[13]一致。相关性分析结果进一步证实,净光合速率、气孔导度、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量均与产量呈极显著正相关($P < 0.001$)。这为本研究中 N_2 处理显著提升净光合速率和叶绿素含量,进而驱动产量增加的生理机制提供了直接的证据。

氮素供应水平通过调控抗氧化酶活性与渗透调节物质积累,影响小麦花后叶片衰老进程。赵吉平等的研究表明,适宜的施氮量可提升氮素代谢关键酶活性,进而提高小麦籽粒产量^[26]。张弦等的研

究显示,氮代谢关键酶活性在开花后 14 d 达到最高值^[27],本研究中在花后 15 d 达到最高值,与之相似。本研究中, N_2 处理在花后 15 d 过氧化物酶活性最高,且丙二醛含量较 CK 降低 14.25%,表明适度施氮可增强活性氧清除能力,延缓膜脂过氧化进程,这与相关性分析结果一致:丙二醛含量与产量负相关。超氧化物歧化酶活性在 N_2 处理下最高(较 N_0 处理提高 62.76%),但旗叶中的丙二醛含量随施氮的增加而下降,这与 Cabral Gouveia 等的研究结果^[28]一致。推测过氧化物酶作为一级抗氧化酶在维持氧化还原平衡中起主导作用,而超氧化物歧化酶活性的升高可能是氧化胁迫加剧的补偿性响应。丙二醛含量与产量的显著负相关,直接解释了 N_2 处理下丙二醛含量最低对保障高产量的重要性。

此外, N_2 处理下可溶性糖含量较 N_0 处理提高 102.45%,而可溶性蛋白含量在 N_1 处理下达峰值,较 N_0 提高 366.67%,揭示氮素通过调控碳氮代谢协同性影响同化物分配。从具体处理效果看, N_2 处理

实现了产量与可溶性糖含量的协同最优,其可溶性蛋白含量虽略低于 N1 处理,但差异不显著。相关性分析结果表明,产量与可溶性蛋白、可溶性糖含量均呈正相关。这说明适量减氮(N2 处理)更能促进光合产物向可溶性糖转化,从而增强渗透调节能力以支撑高产;而高氮(N1 处理)则优先支持蛋白质合成,这可能与氮同化关键酶活性上调有关,研究结果为通过优化氮素供应来协调碳氮代谢提供了理论依据。

3.2 不同减氮水平对春小麦成熟期土壤养分的影响

氮、磷、钾是作物生长的三大核心营养元素,施肥结构失衡不仅会降低养分利用效率,还可能导致减产,并引发环境污染^[29]。本研究表明,N2 处理下土壤铵态氮含量比 N0 处理显著提高 49.57%,与樊文娟等的研究结果^[30]一致,说明适量施氮有助于提高土壤铵态氮含量,解释了其促进作物产量的作用。与不施氮(N0)相比,N1、N3 处理显著提高了土壤铵态氮含量,而 N2 处理与 N0 处理差异不显著。随着施氮量从 N1(300 kg/hm²)降至 N2(270 kg/hm²)再降至 N3(240 kg/hm²),铵态氮含量表现为高一稳一高的波动趋势,其中 N2 处理下铵态氮含量与 N1、N3 处理均无显著差异,表现相对稳定,表明适量减氮(N2)有助于维持铵态氮的平稳供应。硝态氮含量在适量施氮下有所提升,但过量施氮则受到抑制,这与 Yang 等的研究结果^[31]一致,表明氮素失衡会影响氮循环。硝态氮含量与产量同样呈极显著正相关关系($P < 0.001$)。各处理间速效钾含量无显著差异,但适量施氮可能通过提高养分利用率间接促进产量,Spearman 分析结果显示,速效钾含量与产量显著负相关($P < 0.05$),且 N3 处理下速效磷含量较 N0 显著下降 28.91%,这与柴雪茹等的研究结论^[32]相反,可能与土壤基础磷含量及微生物群落不同有关。N2 处理下,碱解氮含量达到峰值,与李娜等的研究结果^[33]一致,表明适量施氮可以促进碱解氮积累。碱解氮含量与产量的相关性虽未达到显著水平,但解释了 N2 处理下碱解氮含量最大,对作物生长与产量具有促进作用,而过量施氮可能导致碱解氮流失,降低土壤肥力。综上,科学合理施氮不仅有助于保持土壤养分平衡,还通过优化关键养分的有效性显著提高作物产量,推动农业高效与可持续发展。

3.3 不同减氮水平对春小麦产量和产量构成因素以及肥料利用率的影响

氮素是农业生产中影响作物生长发育的重要

因素之一,施氮显著影响小麦氮素利用效率,也是产量三要素形成的协同限制条件。研究表明,施氮量在 0 ~ 300 kg/hm² 范围内,小麦的籽粒产量和蛋白质含量均呈现出二次曲线关系^[34]。这与施氮量与产量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量呈显著正相关($P < 0.05$)的结论一致,表明合理的氮素供应可通过提升抗氧化能力和代谢水平促进产量形成。当施氮量超过一定范围时,籽粒产量增加不显著,且氮素利用效率降低^[35-36]。如 Wang 等研究发现,施氮可显著提升小麦的有效穗数、穗粒数、千粒重及总产量^[37]。本研究也证实,氮肥施用量对产量存在显著调控效应,在 270 kg/hm² 施氮量(N2 处理)条件下,产量构成三要素呈现协同增效特征,随施氮量的增加呈先升后降趋势,这与郑天翔等的研究结果^[13]一致。姜丽娜等研究发现,当氮肥施用量超过作物生理需求阈值时,氮素养分利用率、农学效率及生产效率呈现显著递减趋势^[38],这一趋势在糜子和大麦等作物中亦有验证^[39-40]。合理调控氮肥施用量能够协同提升作物产量与氮素利用率,而过量施氮则可能引起营养生长过旺、养分流失及生殖发育受限,从而抑制作物产量^[41]。在此背景下,本研究进一步通过 Spearman 相关性分析探讨了春小麦的产量与其生理特性及土壤养分含量之间的关系,这些结果进一步证实了合理施用氮肥可通过促进光合作用、提升抗氧化能力及优化代谢水平,提升小麦产量的潜力。综上,合理施氮可提升小麦旗叶光合作用、抗氧化能力,减轻氧化损伤,从而增强作物生长与产量。

4 结论

春小麦产量和氮肥利用效率在 N2(270 kg/hm²)处理下达到最优水平,相较于不施氮处理(CK),穗粒数、有效穗数、千粒重和籽粒产量均显著提高,同时氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力也显著提升。与 N1 相比,减施 10% 氮肥(N2)处理下春小麦的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均呈现升高趋势,而胞间 CO₂ 浓度则伴随性降低,证实合理的氮素供应可促进植物光合作用及气体交换能力,同时提高叶绿素水平。此外,N2 处理显著降低了丙二醛含量,并诱导较高的超氧化物歧化酶活性;而过氧化物酶活性在 N1 处理下达到峰值,表明适量施氮可有效缓解氧化胁迫,提高植物的生长代谢水平,进而维持生理稳定性。土

壤养分分析结果表明,在作物成熟期,氮肥水平对土壤养分有效性产生差异化调控。过量施氮会协同诱导硝态氮异常累积和速效磷有效性受到抑制,凸显土壤养分失衡的潜在风险。综上,270 kg/hm²的氮素管理策略通过协同调控光合效能、抗氧化防御系统及土壤养分供给,在保障无机氮有效性的同时规避磷素抑制,从而提升产量和氮肥利用效率,维持干旱区春小麦产量稳定。

参考文献:

- [1] Zhang Q Q, Men X Y, Hui C, et al. Wheat yield losses from pests and pathogens in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107821.
- [2] 潘晓东, 韩爱民, 徐建伟, 等. 小麦产量与主要农艺性状的相关性分析[J]. *现代化农业*, 2024(12): 2-6.
- [3] Kaur G, Asthir B, Bains N S, et al. Nitrogen nutrition, its assimilation and remobilization in diverse wheat genotypes [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2015, 17(3): 531-538.
- [4] 张永强, 齐晓晓, 张璐, 等. 氮肥运筹对滴灌冬小麦叶片光合特性及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2020(1): 141-145.
- [5] Duan J Z, Shao Y H, He L, et al. Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134088.
- [6] Wang H, Huang Y, Jiang G. Effects of base topdressing ratio of nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and use efficiency of spring wheat under drip irrigation [J]. *Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 297-300.
- [7] 彭雪松. 河南省小麦玉米化肥施用状况与应用效果研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
- [8] 蔡瑞国, 张敏, 尹燕桦, 等. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 53-62.
- [9] 易媛, 董召娣, 张明伟, 等. 减氮对半冬性中筋小麦产量、NUE及氮代谢关键酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 365-374.
- [10] 赵鹏, 陈卓. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6): 1014-1018.
- [11] 惠晓丽, 马清霞, 王朝辉, 等. 基于旱地小麦高产优质的氮肥用量优化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2): 233-244.
- [12] 廖雨, 胡雨彤, 冯耀祖, 等. 施氮量对藜麦养分吸收与分配的影响[J]. *天津农业科学*, 2024, 30(12): 10-17.
- [13] 郑天翔, 程红玉, 郭增鹏, 等. 减量施氮对河西灌区春小麦光合特性及产量的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(1): 94-101, 112.
- [14] 贺峥峥. 施氮量对不同氮效率品种小麦旗叶光合特性和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [15] 王文政, 李亚静, 张敏, 等. 施氮量对强筋小麦光合、产量、蛋白质含量和加工品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(4): 462-471.
- [16] 马艳雨, 杨再磊, 冯耀祖, 等. 外源硒肥对藜麦生物学指标及其生理特性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(6): 1668-1678.
- [17] Li B B, Ding Y, Tang X L, et al. Effect of L-arginine on maintaining storage quality of the white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(4): 563-574.
- [18] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 张永强, 陈传信, 徐其江, 等. 氮肥增效剂与氮肥减量配施对冬小麦叶片生理及产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(6): 1319-1325.
- [22] 聂浩亮, 黄少辉, 杨军芳, 等. 氮肥管理及氮素形态对强筋冬小麦产量、品质及氮肥利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(12): 1590-1598.
- [22] 郭鹏燕, 任杰成, 赵吉平, 等. 不同冬小麦品种(系)产量形成分析及种质筛选[J]. *东北农业科学*, 2022, 47(4): 5-8, 37.
- [24] 邵千顺, 王斐, 王克雄, 等. 宁夏南部山区冬小麦抗旱指标鉴定研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 66-71.
- [25] 马静丽, 方保停, 乔亚伟, 等. 减氮对豫北限水灌溉冬小麦冠层结构和光合特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(3): 346-355.
- [26] 赵吉平, 任杰成, 郭鹏燕, 等. 施氮量对小麦氮素代谢关键酶活性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(10): 1222-1225.
- [27] 张弦, 苏豫梅, 高文伟, 等. 不同施氮水平对小麦旗叶氮素代谢相关酶活性的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2014, 37(4): 317-320.
- [28] Cabral Gouveia G C, Galindo F S, Dantas Bereta Lanza M G, et al. Selenium toxicity stress - induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants; characterization of symptoms and plant metabolic adjustment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110916.
- [29] 刘红杰, 任德超, 张素瑜, 等. 不同施肥模式对冬小麦产量和土壤养分的影响[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(8): 225-233.
- [30] 樊文娟, 张小娟, 鱼小军. 氮磷配施对甘肃省武威灌区扁蓿豆种子田土壤养分的影响[J/OL]. *草原与草坪*, 2025: 1-18(2025-05-09)[2025-06-01]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250508.1738.004>.
- [31] Yang X S, Hu Z Y, Xie Z J, et al. Low soil C:N ratio results in accumulation and leaching of nitrite and nitrate in agricultural soils under heavy rainfall [J]. *Pedosphere*, 2023, 33(6): 865-879.
- [32] 柴雪茹, 王贺正, 马嵩科, 等. 秸秆还田配施氮肥对豫西旱地麦田土壤速效养分和小麦氮肥利用效率的影响[J]. *山东农业科学*, 2025, 57(4): 98-106.
- [33] 李娜, 吕彩霞, 信会男, 等. 不同施氮量对滴灌小麦性状及根区土壤养分的影响[J]. *新疆农业科学*, 2025, 62(1): 87-94.
- [34] 曹承富, 孔令聪, 汪建来, 等. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11

林伟伟,陈志涵,秦彬. 氮肥管理优化对水稻氮代谢效率、产量及土壤养分平衡的综合效应[J]. 江苏农业科学,2026,54(9):108-116.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.09.013

氮肥管理优化对水稻氮代谢效率、产量及土壤养分平衡的综合效应

林伟伟¹, 陈志涵², 秦彬²

(1. 漳州职业技术学院食品工程学院, 福建漳州 363000; 2. 福建农林大学农学院, 福建福州 350002)

摘要:剖析氮肥运筹对水稻养分吸收、产量形成及土壤理化的调控机制,有助于阐明氮素高效利用驱动高产的生理生态途径。试验于 2023—2024 年开展,以甬优 2640 为材料,采用大田种植模式,设置 5 个处理:当地常规施肥(CK)、氮肥运筹穗肥(T1)、氮肥运筹粒肥(T2)、均衡施肥(T3)、不施氮肥(T0)处理。通过多维度系统分析,探究氮肥运筹对水稻氮素分配、产量构成的影响,及其与土壤理化性质间的互作机制。结果表明,在水稻灌浆期,相较于 CK, T1、T2、T3 处理能增强水稻光合作用,提高干物质转运量、地上部含氮量及成熟期氮素积累量。同时, T1、T2、T3 处理还显著提升了水稻谷氨酸合成酶的活性。产量数据显示,2023 年 T1 处理的产量比 CK、T2、T3 处理分别提升 14.56%、6.20%、10.90%;2024 年 T1 处理的产量比 CK、T2、T3 分别提升 18.97%、9.66%、14.13%。土壤理化性质分析结果表明,将氮素施用时期后移可上调土壤氮代谢基因的表达水平,增强土壤酶活性。其中, T1 处理相较于 T2、T3 处理,在维持土壤生态稳定性方面表现更为优异。综上所述,将氮肥运筹调整为穗肥处理(T1)具有显著优势。该处理不仅可有效提升水稻氮代谢酶活性与氮素转运效率,增强光合作用和干物质积累能力,还能稳定土壤养分含量与氮代谢基因表达水平。通过这种方式,能够在实现水稻增产的同时,维持良好的农田生态平衡,协同提升农业生产效益与生态效益。

关键词:水稻;氮素运筹;氮代谢;土壤养分

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)09-0108-09

水稻(*Oryza sativa* L.)作为全球三大主粮之一,肩负着保障超 35 亿人粮食安全的重任,更是亚洲超

60% 居民热量摄入的重要来源^[1-2]。受人口增长和膳食升级影响,2050 年全球稻米需求预计增长 28%~34%,提升水稻产量迫在眉睫^[3]。当前,氮素管理失衡限制了水稻可持续生产,2022 年我国农用氮肥消费量占全球 31%,但利用率仅为 30%~41%,远低于发达国家水平。粗放施肥造成田间氨挥发损失率高达 18%~37%,水体富营养化面积占主要稻区流域的 42%^[4]。而缺乏科学规划的减氮行为,会导致 6%~15% 的产量损失^[5]。因此,探寻可被广泛接受且保产的科学氮肥管理策略,对推动水稻生产可持续转型意义重大。

收稿日期:2025-04-13

基金项目:漳州职业技术学院博士科研启动基金(编号:ZZYB2403);漳州市自然科学基金(编号:ZZ2025JH05);福建省中青年教育科研项目(编号:JAT251318);福建省自然科学基金(编号:2022J01142)。

作者简介:林伟伟(1984—),男,福建莆田人,博士,讲师,研究方向为食品质量与安全、农业生态学。E-mail:linweiwei884477@163.com。

通信作者:秦彬,博士研究生,研究方向为作物生理生态。E-mail:15776583358@163.com。

(1):46-50.

[35] 曲文凯,徐学欣,郝天佳,等. 施氮量对滴灌冬小麦-夏玉米周年产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022,28(7):1271-1282.

[36] 王壮志,杨蕊,李秀,等. 施氮量对江汉平原中低产田小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报,2023,37(1):159-168.

[37] Wang L F, Chen J, Shangguan Z P. Photosynthetic characteristics and nitrogen distribution of large-spike wheat in Northwest China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(3):545-552.

[38] 姜丽娜,岳影,李金娜,等. 施氮量对小麦花后氮素分配及氮

素利用的影响[J]. 作物杂志,2018(2):80-86.

[39] 宫香伟,韩浩坤,张大众,等. 氮肥对糜子籽粒灌浆期农田小气候及产量的调控效应[J]. 中国农业大学学报,2017,22(12):10-19.

[40] Barati V, Ghadiri H, Zand-Parsa S, et al. Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(1):15-32.

[41] 王宇先,李清泉,刘玉涛,等. 密度和施氮量对糜子产量及综合性状的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(36):188-194.