作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(4): 1208−1219 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51083

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

侯思宇 王国璀 韦金贵 谢玮欣 殷 文 樊志龙 柴 强* 胡发龙*

省部共建干旱生境作物学国家重点实验室 / 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070

摘 要: 针对西北干旱灌区适宜小麦高效生产的绿肥配置技术缺乏、小麦高产潜力挖掘不足等问题, 通过开展绿肥配施化学氮肥对小麦干物质积累、转运分配及产量形成的影响研究, 以期为小麦高产探寻适宜的绿肥配置技术。2022—2024 年, 采用二因素随机区组设计, 以小麦为研究对象, 设不施化学氮肥(N0)和施用 180 kg hm^{-2} 化学氮肥(N1) 2 个施氮水平, 麦后夏休闲(G0)、绿肥还田 15,000 kg hm^{-2} (G1)、绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} (G2)、绿肥还田 45,000 kg hm^{-2} (G3) 4 个还田量水平。结果表明, 绿肥和化学氮肥均显著提高了小麦产量和收获指数, 且绿肥强化了化学氮肥的增产效应。与 N0 相比, N1 处理下的小麦籽粒产量、生物产量和收获指数分别提高 23.0%、11.8%和 10.4%; 与 G0 相比, G1、G2 和 G3 处理下的籽粒产量分别提高 22.2%、32.5%和 35.5%, 生物产量分别提高 14.4%、18.5%和 20.0%, 收获指数分别提高 7.2%、12.1%和 13.4%。此外, 与 N1G0 相比, N1G1、N1G2 和 N1G3 籽粒产量分别提高 15.4%、27.0%和 24.0%, 生物产量分别提高 8.8%、11.6%和 11.2%, 收获指数分别提高 6.1%、13.8%和 11.4%, 以 N1G2 处理增产效应最显著。绿肥和化学氮肥均可提高小麦干物质积累速率、促进干物质花前转运和花后积累、提高成熟期干物质在籽粒中的分配量, 且绿肥强化了化学氮肥促进干物质积累和转运分配效应, 以绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 效果最佳。与 N1G0 相比, N1G2 小麦苗期至拔节期、拔节期至花期、花期至成熟期干物质积累速率分别提高 7.9%、11.1%和 8.0%, 干物质最大增长速率和全生育期平均增长速率分别提高 10.4%和 11.5%, 花后积累量和花后积累贡献率分别提高 40.0%和 10.2%, 成熟期籽粒干物质及其占比分别增加 27.0%和 14.0%。在西北干旱灌区, 30,000 kg hm^{-2} 毛叶苕子配施 180 kg hm^{-2} 化学氮肥能促进小麦干物质积累及转运分配, 是该区小麦高产栽培的可行措施。

关键词: 绿肥; 小麦; 产量; 干物质积累; 转运分配; 氮肥替代潜力

Effects of green manure combined with chemical nitrogen fertilizer on dry matter accumulation and yield formation of wheat in arid irrigation areas of northwestern China

Hou Si-Yu, Wang Guo-Cui, Wei Jin-Gui, Xie Wei-Xin, Yin Wen, Fan Zhi-Long, Chai Qiang*, and Hu Fa-Long*

State Key Laboratory of Arid Land Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract: To address the lack of suitable green manure application techniques for efficient wheat production and the underutilized yield potential in the arid irrigated regions of Northwest China, this study examined the effects of green manure combined with chemical nitrogen fertilizer on wheat dry matter accumulation, translocation, distribution, and yield formation. The objective was to identify optimal green manure management strategies for high-yield wheat cultivation. From 2022 to 2024, a two-factor ran-

本研究由国家自然科学基金项目(U21A20218), 国家重点研发计划项目(2021YFD1700204), 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-22-G-12), 甘肃陇原青年英才项目(LYYC-2025-05)和甘肃省 2025 年研究生“创新之星”项目(2025CXZX-762)资助。
This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (U21A20218), the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700204), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-22-G-12), the Gansu Longyuan Youth Talent Project (LYYC-2025-05), and the “Innovation Star” Program of Graduate Students in 2025 of Gansu Province (2025CXZX-762).

* 通信作者(Corresponding authors): 柴强, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn; 胡发龙, E-mail: hufl@gsau.edu.cn
第一作者联系方式: E-mail: housiyu0913@163.com

Received (收稿日期): 2025-09-28; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-11-27.
URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251127.0949.002

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

domized block design was implemented with wheat as the experimental crop. Treatments included two nitrogen levels: no chemical nitrogen fertilizer (N0) and 180 kg hm^{-2} of chemical nitrogen fertilizer (N1), and four green manure treatments: fallow after wheat harvest (G0) and incorporation of green manure at 15,000 kg hm^{-2} (G1), 30,000 kg hm^{-2} (G2), and 45,000 kg hm^{-2} (G3). Results showed that both green manure and chemical nitrogen fertilizer significantly improved wheat yield and harvest index, with green manure enhancing the yield-increasing effect of nitrogen fertilizer. Compared to N0, N1 increased grain yield, biological yield, and harvest index by 23.0%, 11.8%, and 10.4%, respectively. Compared to G0, G1, G2, and G3 increased grain yield by 22.2%, 32.5%, and 35.5%; biological yield by 14.4%, 18.5%, and 20.0%; and harvest index by 7.2%, 12.1%, and 13.4%, respectively. Furthermore, N1G1, N1G2, and N1G3 increased grain yield by 15.4%, 27.0%, and 24.0%; biological yield by 8.8%, 11.6%, and 11.2%; and harvest index by 6.1%, 13.8%, and 11.4%, respectively, compared with N1G0, with the highest yield observed in N1G2. Both green manure and nitrogen fertilizer enhanced the rate of dry matter accumulation, pre-anthesis translocation, and post-anthesis accumulation, as well as dry matter distribution to grains at maturity. Green manure reinforced the effects of nitrogen fertilizer on dry matter dynamics, with the most notable improvements observed at the 30,000 kg hm^{-2} incorporation rate. Compared to N1G0, N1G2 increased dry matter accumulation rates during the seedling to jointing, jointing to flowering, and flowering to maturity stages by 7.9%, 11.1%, and 8.0%, respectively. The maximum and average dry matter growth rates throughout the growing season increased by 10.4% and 11.5%, respectively. Post-anthesis accumulation and its contribution to total dry matter increased by 40.0% and 10.2%, while grain dry matter at maturity and its proportion increased by 27.0% and 14.0%, respectively. The application of green manure at 30,000 kg hm^{-2} combined with 180 kg hm^{-2} of chemical nitrogen fertilizer effectively promoted dry matter accumulation and translocation, making it a promising practice for achieving high wheat yields in the irrigated areas of Northwest China.

Keywords: green manure; wheat; yield; dry matter accumulation; translocation and distribution; nitrogen replace potential

氮素是农业生产不可或缺的关键要素, 对提高作物产量和保障粮食安全具有重要作用[1-2]。然而, 依赖单一化学氮肥来提高作物产量的做法不仅增加了农业生产成本, 还带来资源浪费、环境污染和土壤退化等诸多问题[3-4]。因此, 在不增加化学氮肥投入的前提下, 发展高效农艺技术以实现作物高产已成为现代农业生产面临的重要挑战。作物干物质积累、转运与分配是影响产量的重要生理过程, 其中, 干物质积累反映了光合产物的合成能力, 而光合产物向收获器官的转运与分配能力则决定了最终产量的形成[5-7]。大量研究表明, 合理的耕作措施[8]、种植模式[9]、水肥管理[10]等均可通过优化干物质积累和转运分配实现作物高产。其中, 氮素作为植物光合作用的必需营养元素, 直接影响作物的光合效率和光合产物的积累[11-12]。特别是不同肥料间协同作用, 不仅为作物提供稳定、匹配的氮素供应, 还促进干物质积累及其向收获器官的有效转运, 进而提高产量[13-14]。绿肥是一种天然有机肥料, 能有效改善土壤质量和养分供应条件, 促进作物干物质积累和产量形成[15-16]。研究表明, 绿肥覆盖和全量还田均可增加作物生育后期地上部干物质积累, 并增加干物质向收获器官的分配比例[16]; 休耕季种植绿肥并还田可提高作物花后干物质积累及其对籽粒的贡献率, 是替代化学氮肥、弥补氮肥减施后产量损失的基础[17]。小麦是干旱灌区主栽作物, 生产中普遍存在偏施化肥及施肥与需求不匹配的问题。将绿肥引入小麦生产, 有望通过优化施肥结构促进小麦光合产物的积累及转运分配, 从而实现增产。然而, 当前绿肥配置研究不够深入, 不能精准优化绿肥-化肥配施技术指导该地区小麦高效生产。本研究依托 2017 年布设的田间定位试验, 以小麦为研究对象, 在绿肥不同还田量下, 研究配施化学氮肥对小麦干物质积累、转运分配特征及产量形成的影响, 旨在明确该区小麦高效生产适宜的绿肥配置技术并提供相应理论依据。

1　材料与方法

1.1　试区概况

田间试验于 2022—2024 年在甘肃农业大学武威绿洲农业试验站(37°30′N, 103°5′E)开展。试区地处河西走廊东端, 属温带大陆性干旱气候区, 年均降雨量不足 200 mm, 主要集中在 7 月至 9 月; 年均气温约 7.2℃, 无霜期约 156 d, 年日照时数约 2945 h, 0℃和 10℃以上积温分别为 3513℃和 2985℃, 热量资源表现为“一熟有余、两熟不足”。小麦是主要的粮食作物之一, 连作普遍。试验地土壤类型为灌淤土, 试验开始前 0~30 cm 土层土壤 pH 8.2、全氮 0.68 g kg^{-1}、有机质 14.3 g kg^{-1}、速效磷 25.1 mg kg^{-1}、速效钾 141.0 mg kg^{-1}。

1.2　试验设计

本研究依托 2017 年布设的田间定位试验进行。试验采用随机区组设计, 在小麦播种前设不施化学

氮肥(N0)和施用化学氮肥 180 kg hm^{-2} (N1) 2 个施氮水平; 小麦收后设夏休闲(G0)、绿肥种植并还田 15,000 kg hm^{-2} (G1)、绿肥种植并还田 30,000 kg hm^{-2} (G2)、绿肥种植并还田 45,000 kg hm^{-2} (G3) 4 个还田量水平, 共组成 8 个处理, 每个处理 3 次重复。小区面积为 56 m^2。

供试春小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为宁春 4 号, 绿肥为土库曼毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.)。2022—2024 年试验期内, 春小麦于 3 月中下旬播种, 7月中下旬收获; 春小麦收获后复种毛叶苕子, 并于盛花期刈割, 测定其鲜草生物量, 绿肥从生物量多的小区移入还田量不足的小区。后用秸秆粉碎机粉碎并旋耕还田。春小麦和毛叶苕子播种密度分别为 450 kg hm^{-2} 与 125 kg hm^{-2}, 均采用条播, 行距 15 cm。春小麦基施氮(N) 180 kg hm^{-2}、施磷(P_2O_5) 90 kg hm^{-2}, 绿肥生育期不施肥。春小麦于苗期、孕穗期和灌浆期分别灌水 75、90 和 75 mm; 毛叶苕子于苗期和现蕾前期分别灌水 70 mm 和 90 mm。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 *小麦产量* 小麦成熟期, 各小区随机选择 2 m×2 m 的样方收割, 脱粒后称重, 并按 13%籽粒含水量计算单位面积籽粒产量(grain yield, GY), 风干并烘干后测定单位面积生物产量(biological yield, BY)。

收获指数(harvest index, HI) = GY/BY (1)

氮肥替代潜力(nitrogen replace potential, NRP) = (N0GI – N0G0) / N0G0 × 100% [18] (2)

式中, N0GI 、N0G0 为不同处理的籽粒产量。GI 为不同绿肥还田量, I = 1~3。

1.3.2 *地上部干物质积累量与积累速率* 自小麦苗期开始, 各小区每隔 15 d 随机选取 20 株在 105℃烘箱内杀青 30 min, 随后在 80℃下烘干至恒重, 将植株地上部分按茎、叶、籽粒等器官分开称重, 地上干物质积累量为各部位干重之和。通过以下公式计算干物质积累速率[6]:

$$CGR = (W_2 - W_1) / (T_2 - T_1) \quad (3)$$

式中, CGR 代表小麦的干物质积累速率(kg hm^{-2} d^{-1}), T_2 和 T_1 为测定时期, W_2 和 W_1 分别为 T_2 和 T_1 时期的地上部干物质积累量(kg hm^{-2})。

为进一步研究地上干物质积累对绿肥配施化学氮肥的响应, 采用 Logistic 回归方程拟合小麦生育期内干物质积累过程[16]:

$$Y = \frac{K}{1 + e^{a - rt}} \quad (4)$$

式中, 初始参数(K, r, a)由原始测定数据估计得到:

$$K = \frac{N_1N_4(N_2 + N_3) - N_1N_4(N_1 + N_4)}{N_1N_4 - N_2N_3} \quad (5)$$

$$r = \frac{Ln\left(\frac{K}{N_1} - 1\right) - Ln\left(\frac{K}{N_2} - 1\right)}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

$$a = Ln\left(\frac{K}{N_1} - 1\right) + rt_1 \quad (7)$$

$$t_2 + t_3 = t_1 + t_4 \quad (8)$$

式中, (t_1, N_1)、(t_4, N_4)分别为测定数据序列的始点和终点, (t_2, N_2)、(t_3, N_3)分别为中间两点。

1.3.3 *干物质转运与分配特征* 按以下方法量化地上干物质转运与分配特征[17]:

花前转运量(DMR, kg hm^{-2}) =开花期营养器官干物质积累量–成熟期营养器官干物质积累量 (9)

花前转运率(DMRE, %) =花前干物质转运量/开花期营养器官干物质积累量×100% (10)

花前转运贡献率(DMRCG, %) =花前干物质转运量/成熟期籽粒干物质积累量×100% (11)

花后积累量(DMA, kg hm^{-2}) =成熟期籽粒干物质积累量–花前干物质转运量 (12)

花后积累贡献率(DMACG, %) =花后干物质积累量/成熟期籽粒干物质积累量×100% (13)

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行试验数据整理与汇总, 利用 Origin 2021 软件制图, 采用 SPSS 27.0 统计分析软件进行方差分析(ANOVA)、显著性检验(Duncan 法, $P < 0.05$); 使用 R (Hmisc、dplyr、linkET、ggplot2、tidyverse)进行 Mantel 检验分析小麦干物质积累、转运分配特征的相关关系及各因子对产量的影响。

2 结果与分析

2.1 绿肥配施化学氮肥对小麦产量的影响及氮肥替代潜力

施氮(N1)处理小麦籽粒产量、生物产量和收获指数较不施氮(N0)分别提高 23.0%、11.8%和 10.4% (表 1)。绿肥还田 15,000 kg hm^{-2} (G1)、30,000 kg hm^{-2} (G2)和 45,000 kg hm^{-2} (G3)处理小麦籽粒产量较不复种绿肥(G0)分别提高 22.2%、32.5%和 35.5%, 生物产量分别提高 14.4%、18.5%和 20.0%, 收获指数分别提高 7.2%、12.1%和 13.4%。此外, 与 N1G0 相比, N1G1、N1G2 和 N1G3 籽粒产量分别提高 15.4%、

27.0%和 24.0%, 生物产量分别提高 8.8%、11.6%和 11.2%, 收获指数分别提高 6.1%、13.8%和 11.4%。表明绿肥、化学氮肥可提高小麦籽粒产量、生物产量和收获指数, 绿肥可强化化学氮肥的增产效应, 在施氮 180 kg hm^{-2} 条件下绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 时小麦增产效应最显著。在不施氮肥条件下, N0G1、N0G2 和 N0G3 较 N0G0 小麦籽粒产量分别提高 31.7%、40.0%和 51.4%, 表明绿肥能弱化不施氮导致的小麦减产, 具有一定的化学氮肥替代潜力。通过氮肥替代潜力公式计算得出, N0G1、N0G2 和 N0G3 处理的氮肥替代比例分别为 23.0%、29.0%和 37.3%, 随着绿肥还田量的增加, 其氮肥替代潜力随之增大。

2.2　小麦地上部干物质积累对绿肥配施化学氮肥的响应

2.2.1　*干物质积累速率动态*　　干物质积累速率随生育进程的推进呈现出先升后降的趋势(图 1)。与 N0 相比, N1 处理小麦苗期至拔节期(出苗后 30~45 d)

表 1　不同处理下小麦产量、收获指数及氮肥替代比例

Table 1　Wheat yield, harvest index, and nitrogen replace ratio under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg hm^{-2})	生物产量 Biological yield (kg hm^{-2})	收获指数 Harvest index	氮肥替代比例 N replace ratio (%)
2022	N1G0	6209 d	15,502 d	0.401 bcd	
	N1G1	7170 b	17,090 ab	0.420 b	
	N1G2	7847 a	17,518 a	0.448 a	
	N1G3	7712 a	17,428 a	0.443 a	
	N0G0	4705 f	12,928 e	0.364 e	
	N0G1	5852 e	15,118 d	0.387 d	18.5 b
	N0G2	6209 d	15,780 cd	0.393 cd	24.2 b
	N0G3	6744 c	16,413 bc	0.411 bc	32.8 a
2023	N1G0	6287 c	15,995 cd	0.393 cd	
	N1G1	7172 b	17,202 ab	0.417 b	
	N1G2	7897 a	17,653 a	0.447 a	
	N1G3	7751 a	17,756 a	0.437 a	
	N0G0	4481 e	12,457 e	0.361 e	
	N0G1	5924 d	15,358 d	0.386 d	23.0 b
	N0G2	6313 c	16,344 bc	0.386 d	29.1 b
	N0G3	6884 b	16,789 bc	0.410 bc	38.2 a
2024	N1G0	6219 d	15,715 d	0.396 de	
	N1G1	7255 b	17,057 ab	0.425 bc	
	N1G2	8029 a	17,524 a	0.458 a	
	N1G3	7735 a	17,323 ab	0.447 ab	
	N0G0	4382 e	12,648 e	0.346 f	
	N0G1	6087 d	15,705 d	0.387 e	27.4 b
	N0G2	6467 cd	16,153 cd	0.400 de	33.5 ab
	N0G3	6913 bc	16,583 bc	0.417 cd	40.7 b
显著性(*P*) Significance (*P*-value)					
施氮 N application (N)		**	**	**	
绿肥 Green manure (G)		**	**	**	
施氮×绿肥 N×G		*	**	*	

N1: 小麦季施氮 180 kg hm^{-2}; N0: 小麦季不施氮肥。G0、G1、G2 和 G3 依次代表不复种绿肥、绿肥还田 15,000、30,000 和 45,000 kg hm^{-2}。同列数据后不同小写字母表示同一年份中不同处理间差异显著($P < 0.05$)。**和*分别代表在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。N1: application of 180 kg hm^{-2} chemical nitrogen fertilizer during the wheat season; N0: no nitrogen fertilizer applied. G0, G1, G2, and G3 represent green manure incorporation rates of 0, 15,000, 30,000, and 45,000 kg hm^{-2}, respectively. Different lowercase letters following the values indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). ** and * indicate significance at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

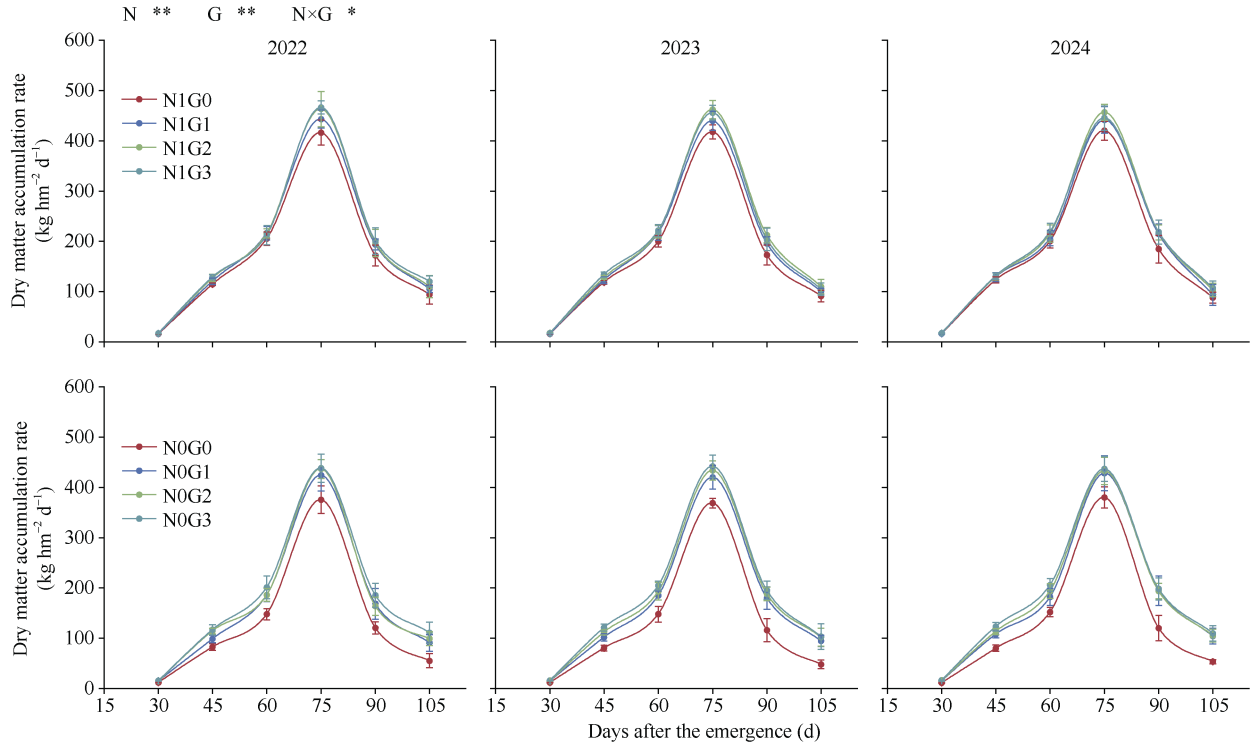


图 1 不同处理下小麦干物质积累速率动态

Fig. 1 Dynamics of dry matter accumulation rate of wheat under different treatments

处理同表 1。N: 施氮; G: 绿肥; N×G: 施氮与绿肥互作。**和*分别代表在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. N: N application; G: green manure; N×G: interaction between N application and green manure. ** and * indicate significant difference at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

干物质积累速率提高 20.4%, 拔节期至花期(出苗后 45~75 d)提高 14.4%, 花期至成熟期(出苗后 75~105 d)提高 4.1%。与 G0 相比, G1、G2 和 G3 处理小麦苗期至拔节期干物质积累速率分别提高 13.6%、20.9%和 25.9%, 拔节期至花期分别提高 7.7%、10.2%和 8.5%, 花期至成熟期分别提高 3.1%、5.5%和 4.1%。此外, 与 N1G0 相比, N1G1、N1G2 和 N1G3 处理苗期至拔节期干物质积累速率分别提高 4.6%、7.9%和 10.4%, 拔节期至花期干物质积累速率分别提高 6.0%、11.1%和 8.6%, 花期至成熟期干物质积累速率分别提高 4.6%、8.0%和 5.6%。说明绿肥、化学氮肥均提高了小麦全生育期的干物质积累速率, 绿肥可强化化学氮肥对小麦干物质积累的促进作用, 以绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 处理效果最佳。

2.2.2 *干物质积累的 Logistic 回归方程分析* 不同绿肥、化学氮肥水平下小麦地上干物质积累量(Y)随出苗后天数(t)的变化过程可用 Logistic 回归方程拟合($R^2 \geqslant 0.995$, 表 2)。与 N0 相比, N1 处理的干物质最大增长速率(V_{max})和平均增长速率(V_{mean})分别提高 6.8%和 7.2%。与 G0 相比, G1、G2 和 G3 处理 V_{max} 分别提高 8.9%、11.6%和 11.6%, V_{mean} 分别提高 16.0%、20.4%和 22.7%, 最大增长速率出现时间(T_m)分别推迟 1.4、1.6 和 1.5 d。此外, 与 N1G0 相比, N1G1、N1G2 和 N1G3 的 V_{max} 分别提高 6.6%、10.4%和 9.0%, V_{mean} 分别提高 7.2%、11.5%和 11.6%, T_m 分别推迟 0.4、0.9 和 0.6 d。说明绿肥和化学氮肥提高了小麦干物质最大增长速率和平均增长速率, 绿肥强化了化学氮肥促进小麦干物质积累的能力, 且维持了干物质快速积累阶段较长的积累天数, 以绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 条件下效果最好。

2.3 绿肥配施化学氮肥对小麦干物质转运分配特征的影响

2.3.1 *小麦开花前后干物质转运规律* 与 N0 相比, N1 处理花前转运量和转运率分别提高 12.3%和 6.5%, 花后积累量和积累贡献率分别提高 27.8%和 4.3%, 而花前转运贡献率降低 18.6% (表 3)。与 G0 相比, G1、G2 和 G3 处理花前转运量分别提高 8.2%、4.7%和 6.2%, 花后积累量分别提高 29.6%、47.0%和 50.8%, 花后积累贡献率分别提高 6.6%、11.3%和 11.9%, 花前转运率分别降低 3.4%、5.5%和 6.5%, 花前转运贡献率分别降低 12.4%、21.2%和 22.3%。此外, 与 N1G0 相比, N1G1 花前转运量提高 7.4%,

表 2　不同处理下小麦干物质积累的 Logistic 回归方程分析

Table 2　Logistic regression analysis of wheat dry matter accumulation under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	最大增长速率出现时间 Day of maximum growth rate (T_m, d)	最大增长速率 Maximum increase rate (V_{max}, kg hm^{-2} d^{-1})	平均增长速率 Mean increase rate (V_{mean}, kg hm^{-2} d^{-1})
2022	N1G0	$Y = 15743/ (1+e^{6.414-0.097t})$	0.997	65.89 bc	383.24 b	169.60 cd
	N1G1	$Y = 16950/ (1+e^{6.408-0.096t})$	0.998	66.53 ab	408.16 ab	182.40 ab
	N1G2	$Y = 17505/ (1+e^{6.425-0.097t})$	0.997	67.18 a	422.80 a	188.15 a
	N1G3	$Y = 17746/ (1+e^{6.348-0.095t})$	0.997	66.59 ab	422.85 a	190.84 a
	N0G0	$Y = 12154/ (1+e^{7.474-0.095t})$	0.995	65.54 c	346.67 c	132.07 e
	N0G1	$Y = 15122/ (1+e^{6.842-0.103t})$	0.996	66.63 ab	388.49 b	163.71 d
	N0G2	$Y = 15639/ (1+e^{6.619-0.100t})$	0.996	66.19 abc	390.96 b	169.15 cd
	N0G3	$Y = 16521/ (1+e^{6.452-0.097t})$	0.997	66.77 ab	398.84 ab	177.96 bc
2023	N1G0	$Y = 15736/ (1+e^{6.389-0.097t})$	0.997	65.88 ab	381.32 d	169.19 cd
	N1G1	$Y = 16917/ (1+e^{6.374-0.097t})$	0.998	65.94 ab	408.78 abc	181.78 ab
	N1G2	$Y = 17861/ (1+e^{6.354-0.095t})$	0.998	66.67 a	425.55 a	191.43 a
	N1G3	$Y = 17650/ (1+e^{6.287-0.095t})$	0.998	66.41 ab	417.86 ab	189.30 a
	N0G0	$Y = 11871/ (1+e^{7.560-0.116t})$	0.995	65.40 b	342.98 e	128.71 e
	N0G1	$Y = 15395/ (1+e^{6.691-0.100t})$	0.997	66.92 a	384.81 d	165.98 d
	N0G2	$Y = 16150/ (1+e^{6.542-0.098t})$	0.997	66.76 a	395.90 cd	173.92 bcd
	N0G3	$Y = 16782/ (1+e^{6.436-0.096t})$	0.997	66.83 a	403.85 bc	180.26 abc
2024	N1G0	$Y = 16063/ (1+e^{6.336-0.096t})$	0.997	66.03 ab	385.10 c	171.93 b
	N1G1	$Y = 17202/ (1+e^{6.319-0.095t})$	0.997	66.53 ab	408.31 ab	183.47 ab
	N1G2	$Y = 17780/ (1+e^{6.312-0.095t})$	0.998	66.68 ab	420.77 a	189.99 a
	N1G3	$Y = 17759/ (1+e^{6.206-0.093t})$	0.998	66.73 ab	412.90 a	189.63 a
	N0G0	$Y = 12189/ (1+e^{7.631-0.117t})$	0.995	65.42 b	355.50 d	132.77 c
	N0G1	$Y = 16011/ (1+e^{6.548-0.098t})$	0.997	67.04 a	390.97 bc	171.97 b
	N0G2	$Y = 16364/ (1+e^{6.453-0.096t})$	0.997	66.99 a	394.17 bc	175.76 b
	N0G3	$Y = 16785/ (1+e^{6.267-0.094t})$	0.997	66.67 ab	394.51 bc	181.59 ab
显著性(P) Significance (P-value)						
施氮 N application (N)				NS	**	**
绿肥 Green manure (G)				**	**	**
施氮×绿肥 (N×G)				NS	*	**

处理同表 1。同列数据后不同小写字母表示同一年份中不同处理间差异显著($P < 0.05$)。**和*分别代表在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters following the values indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). ** and * indicate significant difference at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively; NS: no significant difference.

表 3　不同处理下小麦开花前后干物质转运及对籽粒干物质的影响

Table 3　Dry matter translocation before and after flowering and its contribution to grain dry matter under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	花前转运量 DMR (kg hm^{-2})	花前转运率 DMRE (%)	花前转运贡献率 DMRCG (%)	花后积累量 DMA (kg hm^{-2})	花后积累贡献率 DMACG (%)
2022	N1G0	1988.3 bc	25.1 ab	32.0 b	4220.4 cd	68.0 d
	N1G1	2118.3 a	25.5 a	29.6 c	5051.2 b	70.4 c
	N1G2	2046.7 ab	25.4 a	26.1 e	5800.4 a	73.9 a
	N1G3	2038.3 ab	24.9 ab	26.4 de	5673.6 a	73.6 ab
	N0G0	1755.0 e	26.1 a	37.3 a	2949.8 e	62.7 e

(续表 3)

年份 Year	处理 Treatment	花前转运量 DMR (kg hm^{-2})	花前转运率 DMRE (%)	花前转运贡献率 DMRCG (%)	花后积累量 DMA (kg hm^{-2})	花后积累贡献率 DMACG (%)
2022	N0G1	1840.0 de	23.6 bc	31.5 b	4012.2 d	68.5 d
	N0G2	1820.0 de	23.0 c	29.3 c	4389.3 c	70.7 c
	N0G3	1893.3 cd	22.9 c	28.1 cd	4850.4 b	71.9 bc
2023	N1G0	2061.2 b	26.2 ab	32.8 b	4225.5 cd	67.2 e
	N1G1	2255.9 a	27.3 a	31.5 bc	4916.1 b	68.5 de
	N1G2	2015.7 b	25.2 bc	25.5 f	5881.6 a	74.5 a
	N1G3	2009.5 b	23.9 cd	25.9 f	5741.9 a	74.1 a
	N0G0	1744.2 e	26.4 ab	38.9 a	2737.0 e	61.1 f
	N0G1	1789.0 de	22.3 e	30.2 cd	4135.1 d	69.8 cd
	N0G2	1871.6 cd	22.5 e	29.7 d	4441.4 c	70.3 c
	N0G3	1907.2 c	23.4 de	27.7 e	4976.8 b	72.3 b
2024	N1G0	1987.9 ab	24.6 a	32.0 b	4231.3 c	68.0 e
	N1G1	2111.9 a	24.6 a	29.1 cd	5143.5 b	70.9 cd
	N1G2	1970.5 b	23.9 ab	24.5 f	6058.5 a	75.5 a
	N1G3	2015.7 ab	23.5 ab	26.1 e	5719.6 a	73.9 b
	N0G0	1567.4 c	23.0 b	35.8 a	2814.2 d	64.2 f
	N0G1	1894.2 b	22.8 b	31.1 b	4193.2 c	68.9 e
	N0G2	1900.5 b	23.1 b	29.4 c	4567.0 c	70.6 d
	N0G3	1934.0 b	22.9 b	28.0 d	4979.3 b	72.0 c
显著性(*P*) Significance (*P*-value)						
施氮 N application (N)		**	**	**	**	**
绿肥 Green manure (G)		**	**	**	**	**
施氮×绿肥 (N×G)		**	**	**	*	**

处理同表 1。同列数据后不同小写字母表示同一年份中不同处理间差异显著($P < 0.05$)。**和*分别代表在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. DMR: dry matter remobilization at pre-anthesis; DMRE: dry matter remobilization efficiency 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 following the values indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). ** and * indicate significance at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

N1G2、N1G3 差异不显著, 但 N1G1、N1G2 和 N1G3 花后积累量较 N1G0 分别提高 19.2%、40.0%和 35.2%, 花后积累贡献率较之分别提高 3.3%、10.2%和 9.0%, 花前转运贡献率较之分别降低 6.9%、21.3%和 19.0%。综上, 化学氮肥可在提高小麦干物质花前转运的同时提高花后干物质在籽粒中的积累能力, 且绿肥可强化化学氮肥对干物质转运的效应, 在绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 时达到最大, 为小麦高产提供保障。

2.3.2 小麦成熟期干物质在各器官的分配 与 N0 相比, N1 处理小麦叶片、籽粒和其他器官干物质分别增加 4.2%、23.0%和 10.9%, 籽粒干物质占比增加 9.5%, 但茎秆和叶片干物质占比分别降低 9.0%和 7.5% (图 2)。与 G0 相比, G1、G2 和 G3 处理小麦茎秆干物质分别增加 13.3%、13.2%和 14.7%, 叶片干物质分别增加 12.5%、10.8%和 22.8%, 籽粒干物质分别增加 22.2%、32.5%和 35.5%, 其他器官干物质分别增加 9.8%、12.1%和 11.2%, 籽粒干物质占比分别增加 5.5%、10.2%和 10.8%。此外, 与 N1G0 相比, N1G1、N1G2 和 N1G3 茎秆干物质分别增加 6.4%、4.6%和 7.3%, 籽粒干物质分别增加 15.4%、27.0%和 24.0%, 籽粒干物质占比分别增加 7.7%、14.0%和

11.2%, 但叶片干物质占比分别降低 10.3%、16.4%和 4.3%, 其他器官干物质占比分别降低 10.0%、11.7%和 13.8%。因此, 化学氮肥可提高小麦干物质在籽粒中的分配, 且绿肥能强化化学氮肥提高干物质在籽粒中的分配能力, 其中, 绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 更有优势。



图 2　不同处理下小麦成熟期干物质分配及占比

Fig. 2　Dry matter distribution and its proportion in wheat at maturity stage under different treatments

处理同表 1。N: 施氮; G: 绿肥; N×G: 施氮与绿肥互作。图中不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著($P < 0.05$)。**和*分别代表在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Table 1. N: N application; G: green manure; N×G: interaction between N application and green manure. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). ** and * indicate significance at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively; NS: no significant difference.

2.4　小麦干物质积累、转运分配与籽粒产量间的关系

相关性分析表明, 最大增长速率、平均增长速率、花前转运量、花后积累量、花后积累贡献率、籽粒干物质分配占比间呈正相关(图 3-A)。Mantel 检验分析发现, 籽粒产量与干物质最大增长速率、平均增长速率、花前转运量、花后积累量、花后积累贡献率、籽粒干物质分配占比间呈正相关, 与花前转运贡献率间呈负相关, 而与花前转运率无显著相关关系。此外, 绿肥配施化学氮肥下的小麦产量表现及干物质积累性能更突出(图 3-B)。可以得出, 绿肥与化学氮肥配施通过促进小麦干物质积累、增强干物质花前转运和花后在籽粒的积累、提高干物质在籽粒中的分配, 最终实现小麦高产。

3　讨论

3.1　绿肥强化化学氮肥的增产效应及替代化学氮肥的潜力

合理施用氮肥是实现作物高产的关键环节, 而绿肥与化学氮肥配施作为氮素管理优化的重要路径, 被证明具有显著的增产潜力[19-20]。本研究发现, 绿肥能增强化学氮肥对小麦的增产效应, 尤其在绿肥还田 30,000 kg hm^{-2} 配施化学氮肥时最突出, 可使小麦籽粒产量较传统施氮提高 27.0%。这一结果强调了合理配置绿肥与化学氮肥在促进作物高产中的重要性, 与云南省玉米-绿肥轮作系统中绿肥配施化学

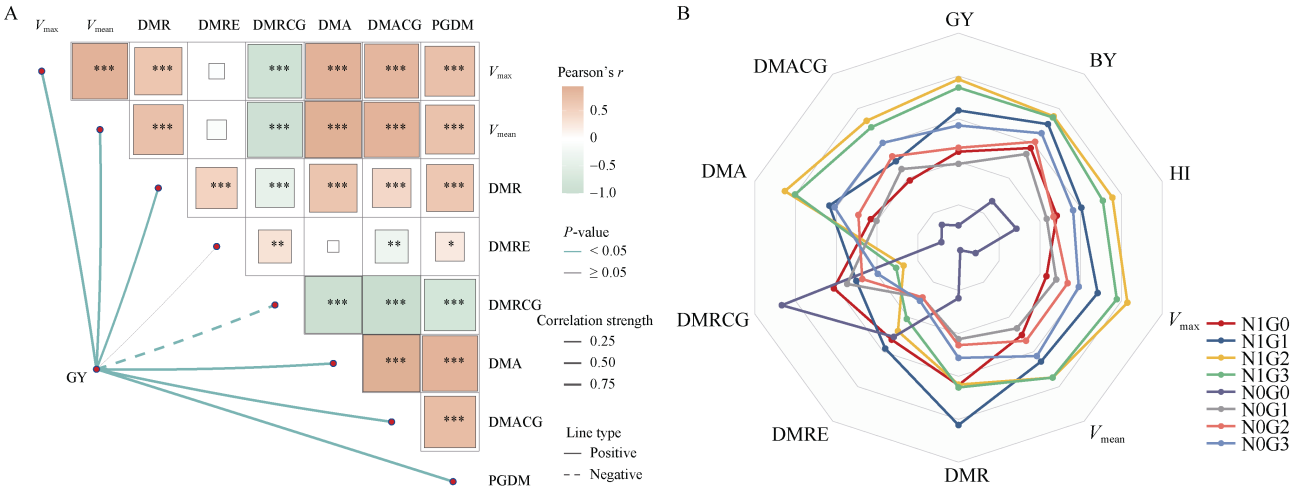


图 3 小麦干物质积累、转运分配特征与籽粒产量间的关系

Fig. 3 Relationship between dry matter accumulation, translocation, distribution characteristics, and grain yield of wheat

处理同表 1。图 A: Mantel 检验; 图 B: 产量及干物质积累性能的综合评估。GY、BY、HI、V_{max}、V_{mean}、DMR、DMRE、DMRCG、DMA、DMACG、PGDM 分别表示籽粒产量、生物产量、收获指数、最大增长速率、平均增长速率、花前转运量、花前转运率、花前转运贡献率、花后积累量、花后积累贡献率、籽粒干物质分配占比。*、**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 概率水平相关性显著。Treatments are the same as those given in Table 1. Fig. A: Mantel test; Fig. B: comprehensive evaluation of yield and dry matter accumulation performance. GY, BY, HI, V_{max}, V_{mean}, DMR, DMRE, DMRCG, DMA, DMACG, and PGDM represent grain yield, biological yield, harvest index, maximum growth rate, average growth rate, pre-anthesis translocation, pre-anthesis translocation rate, pre-anthesis translocation contribution rate, post-anthesis accumulation, post-anthesis accumulation contribution rate, and grain dry matter distribution ratio, respectively. *, **, and *** indicate significant correlations at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

氮肥获得最高产量的结果相似[21]。绿肥强化化学氮肥的增产效应，其可能机制主要体现在以下方面：一是绿肥通过固氮与矿化提供稳定氮源，而化学氮肥提供速效氮，二者配施可实现氮素供给的数量与时序匹配，满足作物不同生育阶段的需求[14,22]；二是绿肥还田能改善土壤结构，增强土壤持水保肥能力和养分蓄存能力，进而提高化学氮肥的有效性[23]；三是绿肥能提高作物根系活力与养分吸收能力，进而增强增产效果[10]。本研究中，绿肥可替代化学氮肥 23.0%~37.3%，而在华北冬小麦季节性休耕区，冬闲期种植绿肥可替代化学氮肥 15.7%~26.2%，略低于本研究结果。可能原因是河西地区热量与辐射资源充足，补充灌溉可保证绿肥在关键生育期的水分需求，从而形成更高的绿肥生物量与固氮潜力，绿肥翻压后分解和矿化过程的水分和温度条件更稳定，有利于有机氮向无机氮的连续释放。同时，河西灌区以沙壤土为主，可溶性盐含量较高，固氮残体与根系分泌物进入土体后增加有机胶结物质促进团聚体形成，保证氮素的可利用性[14,18,24]。相较之下，华北冬闲期受光照限制和不稳定降水制约，绿肥生育期短、可获得绿肥生物量与生物固氮量偏低，且华北地区更易遭受集中降雨增加氮素淋失风险，导致实际可利用的氮素贡献低于潜在水平[17]。绿肥替代化学氮肥的潜力不仅体现在维持作物产量方面，还体现在改善土壤健康、增加生态效益等方面。西北干旱灌区研究发现，绿肥可提高经济效益和生态经济效益达 59.4%和 77.9%，主要原因在于绿肥还田可增加耕层土壤氮素含量、提高土壤氮代谢酶活性和丰富土壤微生物多样性，从而提高作物对氮素的吸收与利用，同时降低生态成本[4]。

3.2 绿肥可强化化学氮肥提高小麦干物质积累及向籽粒的转运分配

干物质积累是决定作物最终产量的核心要素[7]。本研究发现，绿肥可强化化学氮肥对小麦地上干物质积累的促进作用，不仅在干物质快速积累阶段积累速率最快，且在生育后期有效保持较高的增长速率。其主要原因有：(1) 化学氮肥提供速效氮，可快速响应小麦生育前期的高氮需求，而绿肥通过有机氮的矿化与缓释提供持久氮源，二者协同优化了氮素供给的持续性，从而提高氮素供给并促进干物质的持续积累[15,19]。(2) 绿肥在补充氮素的同时释放磷、钾及多种微量元素，缓解单施化学氮肥可能引起的养分结构失衡，形成更加均衡的养分供给格局，促进各器官协调生长并加速光合同化物积累[23,25-26]。(3) 绿肥还田为土壤提供易分解的碳源与含氮底物，促使以富养型细菌与分解功能群为代表的群落比重

上升, 并提升与残体降解、氮素转化相关的代谢潜力; 与此同步, 真菌-细菌比例与放线菌等类群的协同作用有助于加速复杂有机质的级联分解。该群落重塑通过激活关键土壤酶活性, 促进有机氮的再矿化, 从而提高土壤氮素的补给能力, 进一步促进作物的生长发育[4,27]。本研究进一步发现, 当过量绿肥还田和化学氮肥配施时, 小麦地上干物质积累并未持续增加, 甚至出现下降。这可能源于过量氮素供给导致植株营养生长旺盛, 抑制了同化产物向籽粒的有效转运, 扰乱了源库关系平衡, 进而影响籽粒灌浆和干物质的积累[17]。通过 Logistic 回归方程对小麦地上干物质积累量的动态变化进行拟合发现, 绿肥强化化学氮肥提升干物质积累主要通过提高最大增长速率与平均增长速率实现, 其机制可能与土壤养分供给特性和氮素释放在时间与空间上的精准匹配密切相关, 从而显著提高关键生育期的养分供给[11,24]。

干物质的合理分配与高效转运对籽粒形成和作物产量至关重要[27]。小麦籽粒产量的形成主要依赖于花前干物质的再分配和花后干物质的积累[5], 其分配与转运受品种特性[28]、气候条件[29]、种植模式[9]和田间管理措施[28]等多因子调控, 其中氮素供应在驱动干物质分配路径与再转运效率方面尤为关键[30-31]。本研究发现, 绿肥与化学氮肥配施能够有效保障花前干物质的转运, 并显著增强花后干物质的积累能力。这与华北平原的相关研究结果一致, 主要原因在于绿肥提供的氮素能够弥补作物生育后期氮素的不足, 维持较高的光合产能, 从而增加花后干物质的积累[17]。此外, 绿肥可强化化学氮肥提高小麦成熟期籽粒的干物质积累比例, 降低茎叶等营养器官的干物质分配份额。这可能与绿肥延缓叶片衰老、提升小麦生育后期的光合能力密切相关[10]。本研究主要关注小麦干物质的积累、转运和分配过程, 但未深入探讨其分子及生理机制。为更全面地评估绿肥与化学氮肥配施对小麦生理特性和生产力的影响, 未来研究应结合关键生育期的光合作用及养分供应动态进行系统分析, 以期深入揭示绿肥与化学氮肥配施对小麦生长发育的综合效应, 为优化农业生产提供更为科学的理论依据。

4　结论

在小麦-毛叶苕子复种系统中, 毛叶苕子还田可强化化学氮肥对小麦的增产效应。毛叶苕子还田 30,000 kg hm^{-2} 配施化学氮肥可提高小麦地上干物质积累, 有效保障花前干物质转运, 增强花后干物质积累能力, 增加成熟期籽粒中干物质的分配, 小麦籽粒产量较单施化学氮肥提高 27.0%。因此, 30,000 kg hm^{-2} 毛叶苕子还田配施 180 kg hm^{-2} 化学氮肥能够优化西北干旱灌区小麦的干物质积累及转运分配, 是实现该地区小麦高产的可行措施。

References

[1] Knapp S, van der Heijden M G A. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. Nat Commun, 2018, 9: 3632.

[2] Zhang Z G, Wang J, Huang W B, et al. Respective advantages of growing different green manure with nitrogen fertilization in cotton-based cropping systems: insights from a three-year field study. Food Energy Secur, 2024, 13: e70015.

[3] Qiao L, Wang X H, Smith P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. Nat Clim Change, 2022, 12: 574–580.

[4] Wei J G, Yin W, Chai Q, et al. How does the long-term return of mix-sowing green manures increase nitrogen utilization and decrease ecological costs of wheatland under reduced chemical nitrogen input? Resour Environ Sustain, 2025, 21: 100220.

[5] 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.

[6] 陈桂平, 程辉, 范虹, 等. 绿洲灌区宽幅匀播和传统条播春小麦产量对水氮减量的适应性研究. 中国农业科学, 2023, 56: 2461–2473.
Chen G P, Cheng H, Fan H, et al. Study on adaptability of spring wheat yield to water and nitrogen reduction under wide-width uniform sowing and conventional strip sowing in oasis irrigated regions. Sci Agric Sin, 2023, 56: 2461–2473 (in Chinese with English abstract).

[7] 石德杨, 李艳红, 王飞飞, 等. 高密度下扩行缩株对夏玉米干物质与养分积累、转运的调控效应. 中国农业科学, 2024, 57: 4658–4672.
Shi D Y, Li Y H, Wang F F, et al. Regulation effects of line-spacing expansion and row-spacing shrinkage on dry matter and nutrient accumulation and transport of summer maize under high plant density. Sci Agric Sin, 2024, 57: 4658–4672 (in Chinese with English abstract).

[8] Sha Y, Huang Y, Hao Z H, et al. Maize yield in a strip-till system can be increased by increasing nitrogen accumulation, plant growth, and ear development around silking stage in Northeast China. Crop J, 2025, 13: 257–268.

[9] Gao H X, Zhang C C, van der Werf W, et al. Intercropping modulates the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in maize and peanut. Field Crops Res, 2022, 284: 108561.

[10] 杨昭, 柴强, 王玉, 等. 河西绿洲灌区减量灌溉下绿肥对小麦

光合源及产量的补偿效应. 植物营养与肥料学报, 2022, 28: 1003–1014.
Yang Z, Chai Q, Wang Y, et al. Compensation of green manure on photosynthetic source and yield loss of wheat caused by reduced irrigation in Hexi oasis irrigation area. J Plant Nutr Fert, 2022, 28: 1003–1014 (in Chinese with English abstract).

[11] Yan Z J, Chu J C, Nie J W, et al. Legume-based crop diversification with optimal nitrogen fertilization benefits subsequent wheat yield and soil quality. Agric Ecosyst Environ, 2024, 374: 109171.

[12] Rodriguez M P, Carcedo A J P, Correndo A A, et al. Assessing the nitrogen supply of hairy vetch in a soybean-wheat sequence. Field Crops Res, 2024, 316: 109496.

[13] Duan Q Y, Liu Q, Yang R Z, et al. Long-term co-application of nitrogen and organic fertilizers enhances soil quality and wheat growth stability by modulating microbial communities. Appl Soil Ecol, 2025, 213: 106309.

[14] 王国璀, 张松茂, 胡发龙, 等. 绿洲灌区春小麦产量和氮素利用率对绿肥还田量的响应. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1164–1172.
Wang G C, Zhang S M, Hu F L, et al. Response of grain yield and nitrogen utilization efficiency of spring wheat to green manure incorporation amount in oasis irrigation district. J Plant Nutr Fert, 2021, 27: 1164–1172 (in Chinese with English abstract).

[15] Ma D K, Yin L N, Ju W L, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. Field Crops Res, 2021, 266: 108146.

[16] 尚永盼, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿洲灌区绿肥还田利用方式对玉米干物质积累、分配及产量的影响. 作物学报, 2024, 50: 686–694.
Shang Y P, Yu A Z, Wang Y L, et al. Effects of green manure application methods on dry matter accumulation, distribution, and yield of maize in oasis irrigation area. Acta Agron Sin, 2024, 50: 686–694 (in Chinese with English abstract).

[17] 秦文利, 智健飞, 谢楠, 等. 绿肥部分替代化肥对玉米干物质积累与产量形成的影响. 中国农业科学, 2024, 57: 2549–2567.
Qin W L, Zhi J F, Xie N, et al. Effects of partial replacement of chemical fertilizers with green manure on dry matter accumulation and yield formation of maize. Sci Agric Sin, 2024, 57: 2549–2567 (in Chinese with English abstract).

[18] 张松茂, 胡发龙, 殷文, 等. 河西灌区绿肥对春小麦化学氮肥的替代及增产潜力初探. 中国土壤与肥料, 2021(2): 256–261.
Zhang S M, Hu F L, Yin W, et al. Primary exploration of green manure on substitution of chemical N fertilizer and improvement of wheat yield in Hexi irrigation area. Soil Fert Sci China, 2021(2): 256–261 (in Chinese with English abstract).

[19] 王吕, 吴玉红, 秦宇航, 等. 紫云英稻秸秆协同还田与氮肥减量配施对水稻干物质积累、氮素转运及产量的影响. 作物学报, 2024, 50: 756–770.
Wang L, Wu Y H, Qin Y H, et al. Effects of rice straw mulching combined with green manure retention and nitrogen reduction applications on dry matter quality accumulation, nitrogen transport and grain yield of rice. Acta Agron Sin, 2024, 50: 756–770 (in Chinese with English abstract).

[20] Doltra J, Gallejones P, Olesen J E, et al. Simulating soil fertility management effects on crop yield and soil nitrogen dynamics in field trials under organic farming in Europe. Field Crops Res, 2019, 233: 1–11.

[21] 陈检锋, 梁海, 王伟, 等. 玉米-绿肥轮作体系下光叶紫花苕的氮肥替代和土壤肥力提升效应. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1571–1580.
Chen J F, Liang H, Wang W, et al. Effects of smooth vetch (*Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*) incorporation on nitrogen fertilizer replacement and soil fertility improvement in a maize-green manure rotation system. J Plant Nutr Fert, 2021, 27: 1571–1580 (in Chinese with English abstract).

[22] 袁嫚嫚, 刘勤, 张少磊, 等. 太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响. 土壤学报, 2011, 48: 797–803.
Yuan M M, Liu Q, Zhang S L, et al. Effects of biological nitrogen fixation and plow-down of green manure crop on rice yield and soil nitrogen in paddy field. Acta Pedol Sin, 2011, 48: 797–803 (in Chinese with English abstract).

[23] 曹卫东, 周国朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制. 植物营养与肥料学报, 2024, 30: 1274–1283.
Cao W D, Zhou G P, Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health. J Plant Nutr Fert, 2024, 30: 1274–1283 (in Chinese with English abstract).

[24] 柴健, 于爱忠, 李悦, 等. 绿肥还田量结合氮肥减施对绿洲灌区小麦产量和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2023, 49: 3131–3140.
Chai J, Yu A Z, Li Y, et al. Effects of green manure incorporation combined with nitrogen fertilizer reduction on wheat yield and nitrogen utilization in oasis irrigated area. Acta Agron Sin, 2023, 49: 3131–3140 (in Chinese with English abstract).

[25] Amede T, Legesse G, Agegnehu G, et al. Short term fallow and partitioning effects of green manures on wheat systems in East African Highlands. Field Crops Res, 2021, 269: 108175.

[26] 田想, 张威, 伍玉鹏, 等. 绿肥种植配施减量氮肥对橘园土壤肥力及果实质量的影响. 中国土壤与肥料, 2020(6): 197–204.
Tian X, Zhang W, Wu Y P, et al. Effects of planting green manure and reduced nitrogen fertilizer application on soil fertility and fruit quality in *Citrus* orchard. Soil Fert Sci China, 2020(6): 197–204 (in Chinese with English abstract).

[27] Liu F Y, Gao M L, Zhang H Z, et al. Synergistic impact of various straw-return methods and irrigation regimes on winter wheat physiological growth and yield. Field Crops Res, 2024, 316: 109516.

[28] 杨建平, 吕钊彦, 刁明, 等. 滴灌春小麦植株干物质积累与分配特性及对产量的影响. 西北农业学报, 2021, 30(1): 50–59.
Yang J P, Lyu Z Y, Diao M, et al. Accumulation and distribution of dry matter in plants and their contribution to grain yield in drip-irrigated spring wheat. Acta Agric Boreali-Occident Sin, 2021, 30(1): 50–59 (in Chinese with English abstract).

[29] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28: 375–385.
Ma S Y, Wang Y Y, Liu Y N, et al. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat. Chin J Eco-Agric, 2020, 28: 375–385 (in Chinese with English abstract).

[30] 王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿肥还田结合减量施氮对玉米干物质积累分配及产量的影响. 中国农业科学, 2023, 56: 1283–1294.
Wang P F, Yu A Z, Wang Y L, et al. Effects of returning green manure to field combined with reducing nitrogen application on the dry matter accumulation, distribution and yield of maize. Sci Agric Sin, 2023, 56: 1283–1294 (in Chinese with English abstract).

[31] 韦金贵, 毛守发, 江俞欣, 等. 绿肥对减量施氮小麦籽粒产量和氮素利用的补偿机制. 作物学报, 2024, 50: 3129–3143.
Wei J G, Mao S F, Jiang Y X, et al. Compensation effect of green manure on grain yield and nitrogen uptake of wheat with reduced nitrogen supply. Acta Agron Sin, 2024, 50: 3129–3143 (in Chinese with English abstract).