

丛枝菌根真菌与氮肥互作对春小麦氮素利用及产量的影响

张雪静¹, 吴强², 谢岷¹, 高齐¹, 李梦媛¹, 王广琛¹, 张永平¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 2. 河南农业大学农学院, 河南郑州 450046)

摘要: 内蒙古河套灌区化肥过量施用导致土壤退化和农业可持续发展面临挑战。为明确该区域春小麦实现化肥减量高产、高效相统一的适宜施肥模式, 采用两因素裂区试验设计, 探究了丛枝菌根真菌(AMF)与氮肥互作对春小麦氮素吸收利用及产量的影响。结果表明, 施用 AMF 显著提高了春小麦产量($P < 0.05$), 增幅 4.87%, 其主要贡献来自穗数和千粒重的增加; 显著促进小麦氮素积累, 表现为显著提高花前氮素转运量(由 $73.83 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $78.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、花后氮素积累量(由 $28.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $42.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和花后氮素对籽粒贡献率(由 29.83% 提高至 38.80%), 提升氮素利用效率。此外, 施用 AMF 显著改善了根际土壤中 AMF 群落的多样性, 且低施氮量有助于提升群落多样性, 而高施氮量则抑制其多样性。在施用 AMF 条件下, 春小麦的适宜施氮量为 $114.17 \sim 217.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较传统施氮量降低 30%~50%。基于以上结果, 通过丛枝菌根真菌与氮肥合理配施可实现河套灌区春小麦产量和氮素利用效率协同提升。

关键词: 丛枝菌根真菌; 春小麦; 氮肥利用; 产量; 河套灌区

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)12-1681-10

Effects of the Interaction Between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Nitrogen Fertilizer on Nitrogen Utilization and Yield of Spring Wheat

ZHANG Xuejing¹, WU Qiang², XIE Min¹, GAO Qi¹, LI Mengyuan¹,
WANG Guangchen¹, ZHANG Yongping¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: The excessive application of fertilizers in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia has led to soil degradation and posed challenges to sustainable agricultural development. To identify a suitable fertilization model that achieves the dual goals of reduced fertilizer application and high yield and efficiency for spring wheat in this region, a two-factor split-plot experimental design was employed to systematically explore the effects of arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) and nitrogen fertilizer interactions on nitrogen uptake, utilization, and yield of spring wheat. The results showed that the application of AMF significantly increased spring wheat yield($P < 0.05$) by 4.87%, mainly due to increases in the number of spikes and thousand-grain weight. The application of AMF optimized nitrogen distribution patterns and utilization efficiency, as evidenced by a significant increase in nitrogen translocation before anthesis(from $73.83 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $78.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and post-anthesis nitrogen contribution rate(from 29.83% to 38.80%). In addition, the application of AMF significantly improved the diversity of the AMF community in the rhizosphere soil, with community diversity promoted by low nitrogen application, but inhibited by high nitrogen application. Under AMF application, the optimal nitrogen application range for spring wheat was $114.17 - 217.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which is 30%–50% lower than that of the traditional fertilization rate. Based on the above results, the yield and nitrogen

收稿日期: 2025-01-03 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项(NMKJXM202201-4); 内蒙古自治区小麦现代农牧业产业技术体系项目

第一作者 E-mail: 1604728689@qq.com(张雪静)

通讯作者 E-mail: imauzyp@163.com(张永平)

use efficiency of spring wheat in Hetao irrigation area can be increased simultaneously by reasonable application of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen fertilizer.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi(AMF); Spring wheat; Nitrogen utilization; Yield; Hetao Irrigation District.

内蒙古河套平原具有充足的光热资源,是中国中、强筋优质小麦的适宜生产地带。该地区常年化肥施用过量,使其增产效益大幅降低,利用率仅 25%左右,远低于全国平均水平^[1]。长期化肥过量使用导致土壤板结和养分失衡,成为小麦产业可持续发展的主要限制因素。研究发现,利用丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizae fungi, AMF)可促进寄主作物对养分的吸收,提高其干物质积累量和抗性^[2-6]。Hodge^[7]指出,AMF 可以促进有机物分解并提高寄主植物的氮吸收能力。王维华等^[8]通过盆栽试验发现,将小麦、玉米和三叶草秸秆接种 AMF 可以在一定程度上提升土壤中铵态氮、速效钾、有机质等养分含量,促进宿主植物生物量的增长。AMF 对寄主氮吸收的影响受其种类、数量及环境条件和管理措施的调控,氮源种类和含量起关键作用^[9-13]。影响 AMF 多样性的主要因素包括作物种类、土壤理化性质和施肥方式,氮肥施用量增加通常会导致 AMF 多样性和侵染率下降^[14-16]。在养分不足条件下,AMF 通过提高对根系的侵染率和土壤中真菌孢子的数量,来增强寄主植物对氮的吸收能力,从而提高寄主的氮利用效率和生物量^[17-18];过量施用氮肥则会抑制菌根的定殖、孢子生成及菌丝发育,导致 AMF 群落多样性和丰度下降,从而降低寄主植物氮吸收量、产量和干物质积累量^[19-20]。另有研究认为,在施氮条件下,AMF 对寄主植物可能有中性或正向效应^[21-22]。综上所述,国内外有关 AMF 与作物产量及其氮素吸收利用关系的研究结果并不一致,其在小麦栽培中的应用效果也未见报道。因此,本研究在施用 AMF 菌剂条件下,通过田间设置不同施氮量处理,研究不同处理下小麦干物质积累量、籽粒产量和氮肥吸收利用的差异,以期了解 AMF 对小麦氮素吸收利用和产量的效应,探讨河套灌区春小麦实现减肥、高产、高效相统一的适宜施肥量,为构建小麦高产高效栽培技术体系提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年在巴彦淖尔市农牧业科学研

究所杭锦后旗园子渠实验站进行。试验地土壤质地为壤土,有机质含量 $8.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $158 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 8.7,全盐含量 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

供试小麦品种为当地主推品种永良 4 号。试验采用两因素裂区设计,主区为 AMF 拌种处理(A)和未拌种处理(B);副区设置 5 个分蘖期追氮水平,分别为 $0 (\text{N}_0)$ 、 $135 (\text{N}_1)$ 、 $270 (\text{N}_2)$ 、 $405 (\text{N}_3)$ 、 $540 (\text{N}_4) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素(含氮 46%),另外设不施肥为对照(CK)。每个处理重复 3 次,小区面积 30 m^2 。播种前用于拌种的 AMF 菌剂南京翠京元生物科技有限公司生产的内生菌根菌剂,用量为每 $1\ 000 \text{ g}$ 菌剂拌种 25 kg 。小麦采用机播,播种量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 15 cm ,种肥施用磷酸二铵(46% P_2O_5 , 18%N) $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。采用常规灌溉模式,全生育期灌水 4 次,结合分蘖期浇头水追施尿素。各处理施肥量具体见表 1。其他管理措施同当地大田。

表 1 不同处理下的施肥量

Table 1 Fertilization rates of different

	experimental treatments		$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
处理 Treatment	磷酸二铵 Diammonium phosphate	分蘖期追施尿素 Topdressing urea at tillering stage	总施氮量 Total nitrogen application
ACK	0	0	0
AN ₀	300	0	54
AN ₁	300	135	116.1
AN ₂	300	270	178.2
AN ₃	300	405	240.3
AN ₄	300	540	302.4
BCK	0	0	0
BN ₀	300	0	54
BN ₁	300	135	116.1
BN ₂	300	270	178.2
BN ₃	300	405	240.3
BN ₄	300	540	302.4

1.3 测定指标与方法

1.3.1 植株取样及处理方法

在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期,分别从各小区选取 50 cm 的代表性样段,记录样段内的株数和茎数,并按大小比例挑选 10 株,测量株高、茎粗、叶片数及绿色叶片面积(长宽系数法)。将样段内所有植株按叶片、茎鞘、颖片、籽粒分开称鲜重,105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒重,计算干物质积累量,并保留样品用于氮含量测定^[23]。

1.3.2 土壤微生物测定

小麦成熟期,在各试验小区内采用“S”点取样法收集春小麦根际土壤,将土样混合均匀后装入无菌塑封袋,用干冰封存寄往上海派森诺生物科技股份有限公司,进行菌群多样性分析。

1.3.3 考种及测产

在小麦成熟期,每个小区选取 2 m×2 m 的代表性样方单独收获和脱粒,并测定产量;从各小区带回具有代表性的 50 cm 样段进行考种,考种指标包括穗数、穗粒数以及千粒重。

1.3.4 氮素含量测定与氮效率相关指标计算

将 1.3.1 中保留的各生育时期的叶片、茎鞘、颖片、籽粒样品,使用粉碎机粉碎均匀,采用浓硫酸消煮、半微量凯氏定氮法测定各器官含氮量,并计算氮效率指标:

器官氮素积累量 = 器官干物质积累量 × 器官含氮量;

氮肥表观利用率(NRE) = (施氮处理植株吸氮量 - 不施氮处理植株吸氮量) / 施氮量;

氮肥农学效率(NAE) = (施氮处理产量 - 不施氮处理产量) / 施氮量;

氮肥生理效率(NUEa) = 籽粒产量 / 植株吸氮量;

氮肥偏生产力(NPFP) = 施氮处理籽粒产量 / 施氮量;

氮肥生理效率(NUEb) = 施氮处理植株干物质积累量 / 施氮处理植株的吸氮量

花前氮素转运量 = 开花期植株氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量;

花前氮素转运效率 = 花前氮素转运量 / 开花期植株氮素积累量 × 100%;

花前氮素对籽粒氮贡献率 = 花前氮素转运量 / 籽粒氮素积累量 × 100%;

花后氮素积累量 = 成熟期植株氮素积累量 -

开花期植株氮素积累量;

花后氮素对籽粒氮贡献率 = 花后氮素积累量 / 籽粒氮素积累量 × 100%。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2024、SPSS Statistics 27.1 和 OriginPro 2021 进行统计、分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 AMF 和氮肥对春小麦干物质积累的影响

由表 2 可知,随生育进程推进,不同处理的小麦干物质积累量呈均增加趋势,成熟期达到最大值(除 BCK、BN₄ 外)。总体来看,小麦各生育时期的干物质积累量均随着施氮量增加呈先增后降趋势,施用 AMF 在 CK、N₀、N₁ 和 N₂ 条件下各生育时期的干物质积累量均高于未施用 AMF。方差分析结果(表 3)表明,除分蘖期外,其余时期施用 AMF 的小麦干物质积累量均显著高于未施 AMF ($P < 0.05$);施氮量对各生育时期的干物质积累量均有显著或极显著效应 ($P < 0.01$),N₂ 条件下成熟期干物质积累量最高,其余时期 N₃ 条件下干物质积累量最高,各时期二者差异均不显著,且二者在成熟期均显著高于其他施氮水平。除分蘖期外,AMF 与氮肥互作对其他时期干物质积累量的影响均达显著水平。这表明施用 AMF 和适宜施氮量可促进小麦干物质积累。

2.2 AMF 和氮肥对春小麦产量及其构成因素的影响

随着施氮量的增加,小麦产量及其构成因素(除穗粒数外)呈先增加后降低趋势;N₀、N₁ 和 N₂ 条件下,施用 AMF 的产量及其构成因素(除穗粒数外)均高于未施用 AMF,以 N₂ 下的产量最高(表 4)。方差分析结果(表 5)表明,AMF 和施氮量对春小麦产量及其构成因素均有显著或极显著效应;除穗粒数外,施用 AMF 的产量、穗数、千粒重均显著高于未施用 AMF,未施用 AMF 较施用 AMF 减产 4.87%。N₃ 条件下产量和穗数最高,但与 N₂ 间差异不显著,二者显著高于其他施氮水平。AMF 与氮肥互作对产量、穗数、千粒重的影响均达显著水平。这说明适量施用氮肥可显著提升小麦产量,千粒重和穗数为制约产量的关键因素。将小麦籽粒产量(Y)与施氮量(x)进行一元二次拟合回归分析,得到施用 AMF 条件下回归方程为 $Y_A = -0.0309x^2 + 13.46799x + 5434.78$ ($R^2 = 0.9422^{**}$);未施用 AMF 条件下方程为 $Y_B = -0.01805x^2 + 10.22292x +$

表 2 不同处理下春小麦的干物质积累量

Table 2 Dry matter accumulation of spring wheat with different treatments

kg · hm⁻²

处理 Treatment	生育时期(月-日) Growth stages(month-day)					
	分蘖(5-3) Tillering (5-3)	拔节(5-17) Jointing (5-17)	抽穗(6-1) Heading (6-1)	开花(6-10) Flowering (6-10)	灌浆(6-18) Grain filling (6-18)	成熟(7-15) Maturity (7-15)
ACK	525.78	2 972.00	4 623.11	8 529.33	10 953.33	11 907.56
AN ₀	644.89	3 002.22	5 837.33	9 078.22	12 684.89	13 668.89
AN ₁	646.67	3 488.89	6 292.00	9 570.22	13 179.56	14 173.78
AN ₂	649.33	3 965.33	6 708.44	11 259.11	14 865.78	16 636.44
AN ₃	672.44	3 848.00	6 534.67	10 546.67	14 086.67	15 381.33
AN ₄	627.11	3 453.78	6 048.89	9 435.56	13 583.56	14 748.00
BCK	517.33	2 363.11	4 525.56	7 173.33	10 677.78	10 609.33
BN ₀	541.78	2 720.89	5 531.78	7 914.66	11 456.89	12 136.89
BN ₁	606.22	2 860.44	5 940.44	9 018.67	11 681.33	12 805.78
BN ₂	609.33	2 964.89	6 366.22	9 013.33	13 104.00	13 778.22
BN ₃	621.33	3 666.67	6 518.67	11 148.00	14 590.22	14 624.44
BN ₄	643.56	3 458.22	6 207.78	10 487.11	14 276.00	14 036.00

表 3 不同处理下春小麦干物质积累量的方差分析

Table 3 Variance analysis of dry matter accumulation of spring wheat under different treatments

kg · hm⁻²

处理 Treatment	生育时期(月-日) Growth stage(month-day)					
	分蘖(5-3) Tillering (5-3)	拔节(5-17) Jointing (5-17)	抽穗(6-1) Heading (6-1)	开花(6-10) Flowering (6-10)	灌浆(6-18) Grain filling (6-18)	成熟(7-15) Maturity (7-15)
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)						
CK	521.56b	2 667.56d	4 525.56c	7 851.33d	10 815.56c	11 258.44e
N ₀	603.33a	2 861.56cd	5 531.78b	8 407.56cd	12 070.89b	12 902.89d
N ₁	626.44a	3 174.67bc	5 940.44ab	9 294.44bc	12 430.44b	13 489.78c
N ₂	629.33a	3 465.11ab	6 366.22a	10 136.22ab	13 984.89a	15 196.67a
N ₃	646.89a	3 757.33a	6 518.67a	10 847.33a	14 338.44a	15 002.89ab
N ₄	635.33a	3 456.00ab	6 207.78a	9 961.33b	13 929.78a	14 392.00b
菌剂 Fungal inoculant(F)						
A	627.70a	3 455.04a	6 007.41a	9 714.30a	13 225.60a	14 413.78a
B	589.93a	3 005.70b	5 526.44b	9 029.56b	12 631.00b	12 998.44b
变异来源 Variation source						
氮肥 N	3.285*	13.526**	38.222**	12.776**	21.024**	48.902**
菌剂 F	3.274	24.395**	10.716**	6.192*	5.835*	66.553**
氮肥×菌剂 N×F	0.632	2.687*	3.072*	4.024**	3.050*	3.261*

氮肥或菌剂处理后同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。*: P<0.05; **: P<0.01。下同。

Different lowercase letters following the data within the N or fungi treatment in same column indicate significant differences between treatments(P<0.05). *: P<0.05; **: P<0.01. The same below.

5 369.86(R²=0.963 1**)。

对回归方程求解得出,在施用 AMF 条件下,当施氮量为 217.93 kg · hm⁻² 时,产量达到最高值;未施用 AMF 条件下,当施氮量为 283.18 kg · hm⁻² 时,产量达到最高值。

2.3 AMF 和氮肥对春小麦氮素积累与转运的影响

2.3.1 对植株氮含量的影响

由表 6 可知,随生育进程推进,不同处理小

麦植株氮含量呈降低(N₄ 除外)趋势,分蘖期最大。抽穗期、灌浆期和成熟期,施用 AMF 的小麦植株氮含量均显著(P<0.05)高于未施 AMF;除分蘖期外,施氮量对其余各生育时期的氮含量均有极显著(P<0.01)效应;随着施氮量增加,植株氮含量呈先升高后降低趋势,以 N₃ 水平最高,分蘖期不同施氮水平间植株氮含量无显著差异。

表 4 不同处理下春小麦产量及其构成因素

Table 4 Yield and its components of spring wheat under different treatments

kg · hm⁻²

处理 Treatment	产量 Grain yield/(kg · hm ⁻²)	穗数 Spike number/(10 ⁴ · hm ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
ACK	5 506.7	640.7	23.7	38.0
AN ₀	5 926.7	677.3	24.7	39.2
AN ₁	6 600.0	747.7	32.7	39.7
AN ₂	6 993.3	797.0	31.3	41.4
AN ₃	6 783.3	771.3	35.3	40.2
AN ₄	6 700.0	741.0	37.3	39.9
BCK	5 433.3	624.3	25.6	37.9
BN ₀	5 793.3	651.0	29.1	38.1
BN ₁	6 266.7	663.7	32.4	38.6
BN ₂	6 616.7	705.3	35.7	39.3
BN ₃	6 923.3	771.3	38.7	40.3
BN ₄	6 733.3	727.3	40.2	39.7

表 5 不同处理下春小麦产量及其构成因素的方差分析

Table 5 Analysis of variance for yield and its components of spring wheat under different treatments

处理 Treatment	产量 Grain yield/(kg · hm ⁻²)	穗数 Spike number/(10 ⁴ · hm ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)				
CK	5 470.0e	632.5d	28.8b	38.0c
N ₀	5 860.0d	664.2d	35.4a	38.7b
N ₁	6 433.3c	705.7c	35.2a	39.1b
N ₂	6 805.0ab	751.2ab	34.6a	40.3a
N ₃	6 853.3a	771.3a	34.5a	40.3a
N ₄	6 716.7b	734.2bc	34.2a	39.8a
菌剂 Fungal inoculant(F)				
A	6 600.7a	729.2a	30.8b	39.7a
B	6 294.4b	690.5b	33.6a	39.0b
变异来源 Variation source				
氮肥 N	243.841**	23.960**	14.135**	29.558**
菌剂 F	17.370**	18.965**	5.292*	28.494**
氮肥×菌剂 N×F	7.724**	3.228*	0.368	5.394**

2.3.2 对植株氮素积累量的影响

方差分析结果(表 7)表明,随生育进程推移,不同处理小麦植株氮素积累量均呈升高趋势,成熟期达到最大值。除分蘖期外,其余各时期施用 AMF 小麦的氮素积累量均显著高于未施 AMF。除分蘖期外,施氮量对其余各生育时期的氮素积累量均有极显著效应,且随着施氮量的增加,氮素积累量呈先增加后降低趋势,其中 N₃ 条件下氮素积累量最大。除分蘖、拔节期外,AMF 与氮肥互作对其他时期氮素积累量的影响均达显著或极显著水平。

2.3.3 对植株氮素转运的影响

由表 8 可知,施用 AMF 对花前氮素转运效率外的其他指标有显著或极显著效应,显著提高了花前氮素转运量、花后氮素积累量以及花后氮素贡献率,显著降低花前氮素贡献率。花前氮素转运量随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,在 N₃ 条件下达到峰值;花前氮素转运效率在施氮水平间差异不显著;花前氮素贡献率受施氮水平影响显著,随着施氮量的增加而显著提高,在 N₄ 水平达到峰值。花后氮素贡献率则随着施氮量的增加呈下降趋势。氮肥和 AMF 互作对花前

氮素转运量、花前氮素转运效率、花前氮素对籽粒氮贡献率和花后氮素对籽粒氮贡献率影响显著。整体来看,施用 AMF 可显著提高小麦氮素积累量,有助于氮素有效利用。

2.4 AMF 和氮肥对春小麦根际土壤微生物的影响

由表 9 可知,施用 AMF 提高了春小麦根际土壤 AMF 群落的多样性和丰富度。相比未施用

AMF,施用 AMF 条件下土壤微生物群落的 OTUs 数目、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数整体表现更高。施用氮肥对 AMF 群落的影响较为复杂,在 N₁、N₂ 条件下(低氮水平)AMF 群落的多样性提高,而在 N₃、N₄ 条件下(高氮水平)AMF 群落的多样性降低。施用 AMF 条件下,适量施氮(如 N₁、N₂)能够有效提升群落的多

表 6 不同处理下春小麦氮含量的方差分析

Table 6 Variance analysis of nitrogen content in spring wheat under different treatments

处理 Treatment	生育时期(月-日) Growth stages(month-day)					
	分蘖(5-3) Tillering (5-3)	拔节(5-17) Jointing (5-17)	抽穗(6-1) Heading (6-1)	开花(6-10) Flowering (6-10)	灌浆(6-18) Grain filling (6-18)	成熟(7-15) Maturity (7-15)
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)						
CK	2.36ab	1.37c	1.03d	0.98d	0.88e	1.05e
N ₀	2.64ab	1.54c	1.20c	1.11c	1.02d	1.09de
N ₁	2.80a	1.87b	1.57b	1.32b	1.18c	1.18cd
N ₂	2.87a	2.19a	2.09a	1.59a	1.31b	1.35b
N ₃	2.96a	2.44a	2.17a	1.78a	1.48a	1.50a
N ₄	3.12a	2.22a	2.12a	1.66a	1.31b	1.29bc
菌剂 Fungal inoculant(F)						
A	2.89a	1.98a	1.74a	1.43a	1.23a	1.29a
B	2.69a	1.90a	1.65b	1.38a	1.16b	1.19b
变异来源 Variation source						
氮肥 N	1.659	16.734**	85.008**	24.165**	92.681**	18.655**
菌剂 F	1.445	0.965	3.384*	0.797	15.206**	11.031**
氮肥×菌剂 N×F	0.601	0.198	1.116	0.720	2.197	1.339

表 7 不同处理下春小麦植株氮素积累量的方差分析

Table 7 Variance analysis of of nitrogen accumulation in spring wheat plants under different treatments

处理 Treatment	生育时期(月-日) Growth stages(month-day)					
	分蘖(5-3) Tillering (5-3)	拔节(5-17) Jointing (5-17)	抽穗(6-1) Heading (6-1)	开花(6-10) Flowering (6-10)	灌浆(6-18) Grain filling (6-18)	成熟(7-15) Maturity (7-15)
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)						
CK	12.42ab	36.45d	46.53d	76.04e	95.08e	118.18d
N ₀	15.89a	44.63d	66.30c	92.85d	123.43d	141.53c
N ₁	17.65a	58.53c	93.59b	121.29c	145.61c	159.54c
N ₂	18.07a	76.27b	132.67a	164.50b	183.75b	206.73a
N ₃	19.43a	91.54a	141.53a	191.14a	211.74a	224.59a
N ₄	19.80a	76.48b	131.60a	164.80b	181.99b	185.37b
菌剂 Fungal inoculant(F)						
A	18.33a	69.73a	106.86a	140.81a	165.05a	188.53a
B	16.09a	58.57b	97.21b	128.07b	148.82b	156.78b
变异来源 Variation source						
氮肥 N	2.332	30.282**	12.533**	129.169**	152.964**	36.346**
菌剂 F	2.347	12.735**	10.966**	15.518**	32.042**	33.796**
氮肥×菌剂 N×F	0.344	1.531	3.422*	7.368**	2.638*	3.127*

表 8 不同处理下春小麦营养器官氮积累与转运的方差分析

Table 8 Analysis of variance(ANOVA) for nitrogen translocation before flowering and accumulation post-flowering of spring wheat under different treatments

处理 Treatment	花前氮素转运量 Nitrogen translocation amount before flowering/ (kg · hm ⁻²)	花前氮素转运效率 Nitrogen translocation rate before flowering/%	花前氮素贡献率 Nitrogen contribution rate before flowering/%	花后氮素积累量 Nitrogen accumulation amount after flowering/ (kg · hm ⁻²)	花后氮素贡献率 Nitrogen contribution rate after flowering/%
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)					
CK	42.28e	54.96a	50.54d	42.13ab	49.46a
N ₀	48.97d	52.57ab	50.20d	48.68a	49.80a
N ₁	68.23c	56.38a	65.40c	38.25ab	34.60b
N ₂	95.20b	59.95a	69.08bc	46.23ab	30.92bc
N ₃	104.17a	54.55a	75.90ab	33.44bc	24.10cd
N ₄	96.94b	58.88a	83.01a	20.57c	16.99d
菌剂 Fungal inoculant(F)					
A	78.09a	55.80a	61.20b	47.72a	38.80a
B	73.83b	56.63a	70.17a	28.71b	29.83b
变异来源 Variation source					
氮肥 N	185.977**	2.428	26.813**	5.201**	26.813**
菌剂 F	7.173*	0.326	18.291**	26.928**	18.291**
氮肥×菌剂 N×F	15.669**	4.544**	3.400*	1.189	3.400*

表 9 不同处理下春小麦根际土壤 AMF 群落多样性分析

Table 9 Analysis of different treatments on diversity of AMF communities in rhizosphere soil of spring wheat

处理编号 Treatment number	OTUs 数目 OTUs	Chao1 指数 Chao1 index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index
ACK	72	153.31	5.20	0.95
AN ₀	85	181.29	5.50	0.96
AN ₁	108	190.20	5.88	0.97
AN ₂	101	200.38	5.31	0.95
AN ₃	81	153.01	5.55	0.97
AN ₄	71	146.91	5.13	0.94
BCK	74	150.33	4.35	0.88
BN ₀	68	160.70	4.94	0.92
BN ₁	81	167.21	5.40	0.95
BN ₂	85	185.09	5.35	0.95
BN ₃	91	189.14	5.39	0.95
BN ₄	67	139.24	3.39	0.71

OTUs 可反映微生物群落的物种或分类单元的丰富度即群落中所包含的不同操作性分类单元(OTUs)数量。Chao1 指数反映群落的物种丰富度,Shannon 指数和 Simpson 指数分别表示群落的多样性和均匀度。

OTUs reflect the richness of microbial communities, i. e. , the number of different Operational Taxonomic Units(OTUs) present in the community. The Chao1 index reflects the species richness of the community, while the Shannon and Simpson indices represent the diversity and evenness of the community, respectively.

样性和稳定性,而在高氮条件下 AMF 群落多样性明显下降。这表明 AMF 菌剂与适宜氮肥对根际土壤微生物群落有促进作用。

2.5 AMF 和氮肥对春小麦氮肥利用效率的影响

由表 10 可知,AMF 和氮素均对除 NRE 外

其他指标均有极显著效应。施用 AMF 条件下,春小麦氮肥农学效率和氮肥偏生产力均显著高于未施用 AMF,氮肥生理效率和氮肥生产效率则显著下降。随施氮量的增加,氮肥偏生产力呈显著下降趋势,氮肥生理效率、氮肥生产效率先降后升

高趋势,氮肥农学效率呈先增高后降低趋势,且 N_1 条件下氮肥农学效率显著高于其他处理(N_2 除外), N_1 、 N_2 间无显著差异。AMF 与氮肥互作对氮肥农学效率和氮肥偏生产力的影响均达极显著水平。将小麦氮素利用效率(NUE)与施氮量(x)进行一元二次拟合回归分析,得到如下回归方程:

施用 AMF 条件下: $NUE_A = -0.000147572E-$

$4x^2 + 0.03365x + 6.7881 (R^2 = 0.8008^{**})$; 未施用 AMF 条件下: $NUE_B = -8.7573E-5x^2 + 0.02201x + 5.73068 (R^2 = 0.9812^{**})$ 。

对回归方程求解得出,在施用 AMF 条件下,当施氮量 $114.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦氮素利用效率达到最高值;未施用 AMF 条件下,当施氮量为 $125.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦氮素利用效率达到最高值。

表 10 不同处理下春小麦氮素利用效率的方差分析

Table 10 Analysis of variance for nitrogen use efficiency in spring wheat under different treatments $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	NRE	NAE	NFPF	NUEa	NUEb
氮肥 Nitrogen fertilizer(N)					
CK	/	/	/	47.43a	/
N_0	43.05ab	7.22b	108.52a	41.86b	91.55a
N_1	35.37ab	8.30a	54.41b	40.98bc	85.30b
N_2	49.29a	7.49ab	38.19c	34.32de	75.50c
N_3	44.40a	5.76c	28.52d	30.67e	66.83d
N_4	22.28b	4.12d	22.21e	36.32cd	77.56c
菌剂 Fungal inoculant(F)					
A	40.19a	6.96a	51.25a	35.25b	76.44b
B	37.56a	6.20b	49.89b	41.94a	82.26a
变异来源 Variation source					
氮肥 N	0.227	34.616**	20750.517**	13.346**	22.560**
菌剂 F	2.404	9.223**	39.328**	24.813**	11.434**
氮肥×菌剂 N×F	1.013	5.674**	10.772**	1.582	2.178

NRE: 氮肥表观利用率; NAE: 氮肥农学效率; NFPF: 氮肥偏生产力; NUEa: 氮肥生理效率; NUEb: 氮肥生产效率。

NRE: Apparent nitrogen recovery efficiency; NAE: Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer; NFPF: Partial factor productivity of nitrogen fertilizer; NUEg: Physiological efficiency of nitrogen fertilizer; NUEb: Production efficiency of nitrogen fertilizer.

3 讨论

本研究系统探究了丛枝菌根真菌(AMF)与氮肥对春小麦干物质积累、产量及氮素吸收利用相关指标的影响,并分析了根际土壤 AMF 多样性的变化。结果发现,在适宜施氮量条件下,施用 AMF 显著促进了小麦干物质积累和产量形成,这与 Pellegrino 等^[4]的结果相似,表明 AMF 对小麦产量提升有促进作用。本研究中,施用 AMF 条件下春小麦增产 4.87%,增产幅度低于 Zhang 等^[5]报道的平均水平(7.5%),这可能与本研究区域土壤基础养分含量较高有关,说明施用 AMF 需根据因土壤条件因地制宜地调整施用策略。

AMF 通过扩大寄主根系的吸收范围来增强寄主的氮素吸收能力,促进效应受氮肥施用量的显著调控。本研究发现,在施氮量为 $114.17 \sim 217.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,AMF 对小麦氮素吸

收的促进作用最为显著,而过量施氮会抑制 AMF 的效应。这与 Williams 等^[23]的研究结果一致,表明在施用 AMF 条件下,可以通过适当降低氮肥用量来维持较高的菌根共生效应。本研究发现,施用 AMF 显著提高了花前氮素转运量、花后氮素积累量及其贡献率,但对植株含氮量并未产生显著影响,这可能因为干物质量的生长产生了氮素稀释效应(表现为单位组织氮浓度随干物质量增加而下降)。Hodge 等^[7]指出,AMF 可通过分泌特定酶类促进有机氮的矿化,从而增强寄主植物对氮素的获取能力。本研究结果进一步证实,这种促进作用在营养生长期更为显著,这可能是由于 AMF 在小麦生育早期的定殖率较高^[24]。此外,施用 AMF 还增加了小麦根际土壤中 AMF 群落的多样性和丰富度,氮肥施用量对 AMF 群落有显著影响,低施氮量下,AMF 群落的多样性较高,而施用高氮明显降低 AMF 群落的多样性,

表明维持 AMF 群落的稳定和多样性需合理施用氮肥。值得注意的是,施用 AMF 条件下穗粒数显著低于对照,具体原因有待更多研究;但千粒重和穗数显著提高,最终实现了增产。这与 Smith^[24]关于 AMF 调控养分分配的研究结果相符,为深入理解 AMF 调控作物产量形成的机制提供了新思路。同时提示,在施用 AMF 时需要注意氮素供应的均衡性,避免出现生育后期供氮不足的情况。施用 AMF 显著提高了小麦的氮肥利用效率,这与 Makarov^[25]提出的 AMF 促进氮素高效利用的结论相吻合;在 N₁、N₂ 下表现最佳,表明在施用 AMF 条件下,通过合理施氮不仅可以提高小麦产量,还能实现氮肥的高效利用,减少环境负担,从而推动农业可持续发展。

基于本研究结果,建议在河套灌区春小麦生产中,选用优质 AMF 菌剂进行拌种,将氮肥用量控制在 200 kg · hm⁻² 以下,优化基追肥比例,实施水肥一体化。该技术不仅有助于减少氮肥的施用量,还能提高氮肥的利用效率,推进农业绿色发展。本研究未来的目标:进一步阐明 AMF 在不同生育阶段对氮素转运的分子机制,特别是 AMF 如何影响氮素转运相关基因的表达;筛选适应性强的优良菌株,建立高效的菌剂质量评价体系;通过长期定位试验评估 AMF 对土壤微生物群落的影响,明确其对土壤生态系统功能的调控作用,为进一步提升 AMF 在作物生产中的应用提供科学依据。

4 结论

在河套灌区,施用 AMF 显著增加了春小麦产量,平均增产幅度达 4.87%,增产贡献主要来自穗数和千粒重的提高;施用 AMF 条件下小麦花前氮素转运量显著增加,由 73.83 kg · hm⁻²,增至 78.09 kg · hm⁻²,花后氮素对籽粒贡献率显著提高,由 29.83% 提升至 38.80%,提高了氮素利用效率。在施用 AMF 条件下,河套灌区春小麦生产的适宜施氮量为 114.17~217.93 kg · hm⁻²,较传统施肥模式减少 30%~50%,实现了小麦产量与氮肥利用效率协同提升的目标。

参考文献:

- [1] 吴强,张永平,董玉新,等. 施氮量和灌水模式对小麦产量、品质和氮肥利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 334.
WU Q, ZHANG Y P, DONG Y X, *et al.* Effect of nitrogen application rates and irrigation modes on yield, nitrogen use efficiency and quality in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(3): 334.
- [2] VERESOGLOU S D, CHEN B D, RILLIG M C. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 53.
- [3] 张亮, 王晓娟, 王强, 等. 同位素示踪技术在丛枝菌根真菌生态学研究中的应用[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2787.
ZHANG L, WANG X J, WANG Q, *et al.* The role of the isotope tracer technique in ecological research of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 2787.
- [4] PELLEGRINO E, MAARJA Ö, BONARI E, *et al.* Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: A meta-analysis of field studies from 1975 to 2013 [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 210.
- [5] ZHANG S J, LEHMANN A, ZHENG W S, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: A meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 543.
- [6] 陈永亮, 陈保冬, 刘蕾, 等. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4807.
CHEN Y L, CHEN B D, LIU L, *et al.* The role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil nitrogen cycling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4807.
- [7] HODGE A, FITTER A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(31): 13754.
- [8] 王维华, 孙丹丹, 郑锦龙, 等. AM 真菌与作物秸秆对土壤养分和植物生长的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 83.
WANG W H, SUN D D, ZHENG J L, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and plant straw on soil nutrients and plant growth [J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 35(2): 83.
- [9] TANAKA Y, YANO K. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(10): 1247.
- [10] 冯固, 白灯莎, 杨茂秋, 等. 盐胁迫下 AM 真菌对玉米生长及耐盐生理指标的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 743.
FENG G, BAI D S, YANG M Q, *et al.* Influence of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on growth and salinity tolerance parameters of maize plants [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 743.
- [11] 郭静, 罗培宇, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤丛枝菌根真菌群落结构及其侵染的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4677.
GUO J, LUO P Y, YANG J F, *et al.* Influence of long-term fertilization on community structures and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in a brown soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(24): 4677.
- [12] 秦子娟, 朱敏, 郭涛. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对玉米生理

- 生化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 510.
- QIN Z X, ZHU M, GUO T. Influence of mycorrhizal inoculation on physiological and biochemical characteristics of maize (*Zea mays*) under water stress [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 510.
- [13] 朱先灿, 宋凤斌, 徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 470.
- ZHU X C, SONG F B, XU H W. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic characteristics of maize under low temperature stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 470.
- [14] 王晓英, 王冬梅, 黄益宗. 不同施氮水平下 AMF 群落对白三叶草生长及养分吸收的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 143.
- WANG X Y, WANG D M, HUANG Y Z. Effects of AMF community on the growth and nutrient uptake of white clover at different N supply levels [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(2): 143.
- [15] TIAN H, DRIJBER R A, ZHANG J L, *et al.* Impact of long-term nitrogen fertilization and rotation with soybean on the diversity and phosphorus metabolism of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi within the roots of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 53.
- [16] 张学林, 李晓立, 何堂庆, 等. 丛枝菌根真菌对玉米籽粒产量和氮素吸收的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(8): 1603.
- ZHANG X L, LI X L, HE T Q, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on grain yield and nitrogen uptake in maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(8): 1603.
- [17] 金海如, 刘洁, 刘静, 等. 丛枝菌根真菌氮吸收、运转和传递机理的总述[J]. 中国科学: 生命科学, 2012, 42(5): 355.
- JIN H R, LIU J, LIU J, *et al.* Summary of nitrogen absorption, transport and transfer mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2012, 42(5): 355.
- [18] TOLJANDER J F, SANTOS-GONZÁLEZ J C, TEHLER A, *et al.* Community analysis of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria in the maize mycorrhizosphere in a long-term fertilization trial [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, 65(2): 323.
- [19] BAKHSHANDEH S, CORNEO P E, MARIOTTE P, *et al.* Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 130.
- [20] 朱晨. 不同施肥制度对主要农作物土壤中 AMF 群落结构的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- ZHU C. Effects of different fertilization systems on AMF community structure in main crop soils [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [21] WILLIAMS A, BÖRJESSON G, HEDLUND K. The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 41.
- [22] DUFFKOVÁ R, FUČÍK P, JURKOVSKÁ L, *et al.* Experimental evaluation of the potential of arbuscular mycorrhiza to modify nutrient leaching in three arable soils located on one slope [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 143: 116.
- [23] 董文娟, 张永平, 谢岷, 等. 河套灌区春小麦高产栽培水氮高效利用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 127.
- DONG W J, ZHANG Y P, XIE M, *et al.* Efficient utilization of water and nitrogen for spring wheat high-yield in Hetao Irrigation Region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(6): 127.
- [24] SMITH S E, READ D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. Salt Lake: Academic Press, 2010.
- [25] MAKAROV M I. The role of mycorrhiza in transformation of nitrogen compounds in soil and nitrogen nutrition of plants: A review [J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(2): 193.