

缓释尿素减施对冬小麦产量和 氮素利用效率的影响

白东萍, 卢识宇, 谷晓博, 杜娅丹, 宋 慧, 蔡文璟, 李援农

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为优化旱地小麦高效施氮管理,实现高效生产目标,通过2 a(2019—2020年度和2020—2021年度)田间试验,设不施肥(CK)、不施氮(T1)、300 kg·hm⁻²尿素 N(T2, 常规施氮处理)、300 kg·hm⁻²缓释尿素 N(T3)、195 kg·hm⁻²缓释尿素 N(T4)和90 kg·hm⁻²缓释尿素 N(T5)6个处理,分析不同缓释尿素减施量对农田土壤硝态氮分布及累积、氮素吸收与转运、冬小麦产量和氮素利用效率的影响。结果表明,缓释尿素减施处理(T4和T5)显著降低收获期0~200 cm土层的土壤NO₃⁻-N累积量,同时提高0~40 cm土层NO₃⁻-N占比。施用缓释尿素显著提高冬小麦氮素转运量和花后氮素吸收量,T3处理较当地常规施氮处理分别提高12.9%和13.6%。氮素转运对籽粒的贡献率随缓释尿素减施比例的增加呈先增后降的变化趋势,T4处理最大,较其他施氮处理提高0.2%~50.0%。施用缓释尿素可不同程度地改善冬小麦产量构成因素和提高产量;T4处理两年产量分别为8 434.9 060 kg·hm⁻²,2019—2020年度较T2和T3处理分别提高19.7%和13.9%,2020—2021年度分别提高17.3%和10.4%,其经济效益2019—2020年度较T2和T3处理分别提高33.3%和34.0%,2020—2021年度分别提高26.8%和23.2%。缓释尿素减施显著降低氮素表观损失,提高了氮素利用效率和氮肥偏生产力。通过拟合分析发现,缓释尿素施用量为208.7 kg·hm⁻²时,两年产量分别为8 054.8 806 kg·hm⁻²,净效益分别为6 890.8 475 CNY·hm⁻²,NHI分别为78.2%和78.9%,可实现西北旱区冬小麦高产高效。

关键词:缓释尿素;土壤硝态氮;氮素转运;氮素利用效率;冬小麦;产量

中图分类号:S512.1;S143.1 **文献标志码:**A

Effect of reducing the application of slow-release urea on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat

BAI Dongping, LU Shiyu, GU Xiaobo, DU Yadan, SONG Hui, CAI Wenjing, Li Yuannong

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To optimize the efficient nitrogen application management of dryland wheat and achieve the goal of efficient production, A 2-year field experiment (2019–2020 and 2020–2021) was conducted to explore the effects of slow-release urea application reduction on yield and nitrogen utilization of winter wheat. The treatments included no fertilization (CK), no N (T1), 300 kg·hm⁻² urea N (T2, conventional nitrogen application), 300 kg·hm⁻² slow-release urea N (T3), 195 kg·hm⁻² slow-release urea N (T4), and 90 kg·hm⁻² slow-release urea N (T5). The results showed that the slow-release urea treatment (T4 and T5) significantly reduced the NO₃⁻-N accumulation amount in 0~200 cm soil layer and increased the NO₃⁻-N proportion in 0~40 cm soil layer. Application of slow-release urea significantly increased nitrogen transfer volume and post-blooming nitrogen uptake of winter wheat, and T3 treatment increased 12.9% and 13.6%, respectively, compared with the local conventional nitrogen treatment. The contribution rate of nitrogen transport to grain increased first and then decreased with the increase of the reduction rate of slow-release urea application, and reached the maximum under T4 treatment, which increased by 0.2%~50.0% compared with other nitrogen treatments. The application of slow-release urea improved the yield compo-

nents and increased the yield to varying degrees. The 2-year yield of T4 treatment was 8 434 and 9 060 kg · hm⁻², which increased by 19.7% and 13.9% in 2019–2020, and 17.3% and 10.4% in 2020–2021 compared with T2 and T3 treatment, and the economic benefit increased by 33.3% and 34.0% in 2019–2020, and 26.8% and 23.2% in 2020–2021 compared with T2 and T3 treatment, respectively. The reduced application of slow-release urea mitigated nitrogen apparent loss, leading to enhanced nitrogen use efficiency and nitrogen partial productivity. Through fitting analysis, it was found that when the dosage of slow-release urea was 208.7 kg · hm⁻², the high yield and high efficiency of winter wheat was realized, and the 2-year yield was 8 054 kg · hm⁻² and 8 806 kg · hm⁻², the net benefit was 6 890 CNY · hm⁻² and 8 475 CNY · hm⁻², and the *NHI* was 78.2% and 78.9%, respectively.

Keywords: slow-release urea; soil nitrate nitrogen; nitrogen transport; nitrogen use efficiency; winter wheat; yield

氮素是影响小麦产量的重要营养元素,氮素亏缺会严重限制干物质生产和养分吸收,使冬小麦产量下降^[1]。在干旱和半干旱地区,施氮可以提高作物产量,增强抗旱性^[2]。然而,近年来作物生产中施氮量已远远超过农艺经济最优水平,过量施氮不仅会导致冬小麦籽粒氮含量降低,还会造成环境污染^[3–4]。Li 等^[5]研究表明,冬小麦生长季在当地常规施氮量 250 kg · hm⁻²基础上减施 20%可有效降低温室气体排放量,且对作物产量无影响,是高产集约化农田减排的有效措施^[6]。因此,优化氮肥管理技术、减少氮肥无效损失是实现小麦产业绿色高效可持续发展的重要措施。在全球范围内,尿素的一次性基施技术因能简化传统的生育期多次施肥流程、大幅节省劳动力成本而被广泛应用,但其增加了氮淋溶到深层土壤的风险。分次施肥虽然提高了氮肥利用效率和作物产量^[7],又会产生浪费劳动力、生产效率低等问题。缓释尿素具有调控氮素释放速度的特点,可以确保作物整个生育期内氮的持续供应,满足作物生长发育需求^[8]。与普通尿素相比,缓释尿素能够显著降低硝酸盐浸出,减少氮损失,有效提高小麦产量和氮肥利用效率^[9],同时降低环境污染^[10]。郑文魁等^[11]研究发现,在等量施氮条件下,树脂包膜尿素、硫包膜尿素和硫加树脂包膜尿素相比于普通尿素更有利于满足冬小麦关键生育时期对土壤氮素的需求,可显著提高冬小麦产量。张晨阳等^[12]研究表明,缓释肥与尿素配施能显著提高冬小麦的氮素累积吸收量、产量和氮肥利用效率。Zheng 等^[13]和 Xia 等^[14]研究发现,在提高小麦产量和氮素利用效率方面,缓释尿素一次性基施的效果优于普通尿素分次施用。一次基施缓释尿素可满足冬小麦生育后期对氮素的需求,与普通尿素相比能够增产减排,可作为实现简化栽培的重要技术措施。

目前,我国西北旱区对于缓释肥的研究主要集中在不同包膜类型或其与普通尿素不同配比对作

物生长及产量的影响等方面,而缓释尿素减施对冬小麦产量、氮素转运、氮素表观损失和盈余以及氮肥利用效率的影响尚不明晰。基于此,本研究通过 2 a(2019—2020 年度和 2020—2021 年度)田间试验,对比当地常规施氮与缓释尿素减施对西北旱区冬小麦产量和氮肥利用效率的影响,分析不同施氮模式下冬小麦生产的经济效益,旨在进一步优化西北旱区冬小麦氮肥管理措施,为确定冬小麦农田高产高效的最优施氮量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019—2020 年度和 2020—2021 年度在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室灌溉试验站(34°17'N, 108°04'E)进行。试验区年均气温 13.0℃,年均蒸散量 1 500 mm,年均降水量 632 mm(降水主要集中在 7、8、9 月)。供试土壤为中壤土,初始耕层土壤容重 1.40 g · cm⁻³,田间持水量 24.00 g · g⁻¹,凋萎系数 8.50 g · g⁻¹,pH 值 8.12,有机质 16.02 g · kg⁻¹,全氮 0.88 g · kg⁻¹,速效磷 13.67 mg · kg⁻¹,速效钾 182.30 mg · kg⁻¹,碱解氮 52.20 mg · kg⁻¹。

2019 年 10 月—2020 年 6 月和 2020 年 10 月—2021 年 6 月的日平均气温分别为 9.0℃ 和 9.1℃,两个冬小麦生长季总降水量分别为 149.5 mm 和 185.2 mm(图 1)。2019 年 10 月—2020 年 6 月的降水分布表现为前期(播种后~12 月底)和中期(1 月初~3 月底)偏少,后期(4 月初~收获期)较多,其中 91.2 mm(61.0%)降水集中在 4 月和 5 月;2020 年 10 月—2021 年 6 月,降水呈现前期和后期多、中期少的分布趋势,其中 40.3 mm 降水集中在 10 月和 11 月,108.5 mm(58.6%)降水集中在 4 月和 5 月。

1.2 试验材料及试验设计

供试冬小麦品种为‘小偃 22’,供试氮肥包括尿素(N≥46%)和硫包衣尿素(N≥37%,S≥10%),磷

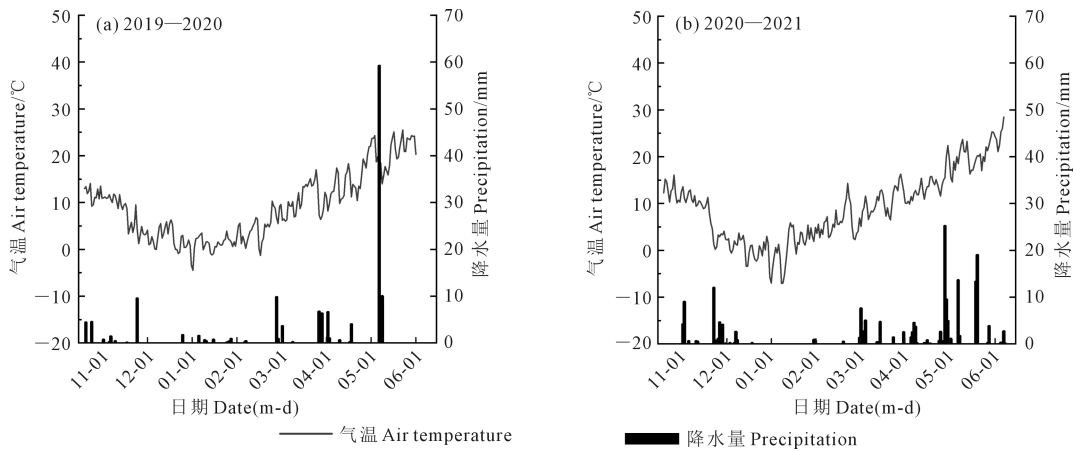


图 1 2019—2020 年度和 2020—2021 年度冬小麦生长季的日平均气温和日降水量

Fig.1 Daily air temperature and precipitation during the growth period of winter wheat in 2019–2020 and 2020–2021

肥和钾肥分别为过磷酸钙 ($P_2O_5 \geq 16\%$) 和硫酸钾 ($K_2O \geq 51\%$)。其中硫包衣尿素以经过筛选的优质尿素为核心,以熔融硫磺和微晶聚合物及各种微量元素为包膜外壳,制成优质黄色缓释肥料,释放期为 90 d。

试验为完全随机设计,设 6 个处理:不施肥 (CK)、不施氮 (T1)、 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素 N (当地常规施氮量, T2)、 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 缓释尿素 N (T3)、 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 缓释尿素 N (即 T3 用量的 65%, T4) 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 缓释尿素 N (即 T3 用量的 30%, T5)。每个处理重复 3 次,地块均为南北方向,面积为 16 m^2 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$)。除不施肥处理 CK 外,其余各处理均施用 P_2O_5 和 K_2O ,用量分别为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;所有肥料均为播种前基施。冬小麦分别于 2019 年 10 月 19 日和 2020 年 10 月 19 日播种,于 2020 年 6 月 1 日和 2021 年 6 月 7 日收获。播种量为 $12.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 20 cm。除草和防虫等其他田间管理措施与当地常规农田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量 各小区分别在苗期、拔节期、灌浆期和成熟期取 0~100 cm 土层土壤样品 (取土间隔为 10 cm),播种前和收获后取 0~200 cm 土层土壤样品 (0~100 cm 取土间隔为 10 cm,100 cm 之后间隔为 20 cm),重复 3 次。取样点在每块地中间相邻的两行冬小麦之间。土壤样品混合后过 0.5 mm 筛网,用连续流动分析仪 (Auto analyzer 3, 德国 Bran Luebbe 公司) 测定土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量。土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 累积量计算公式如下:

$$M = c \times h \times \gamma / 10 \quad (1)$$

式中, M 为土壤 NO_3^- -N (NH_4^+ -N) 累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); c 为土壤 NO_3^- -N (NH_4^+ -N) 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); h 为土层厚度 (cm); γ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

1.3.2 植株氮素吸收及转运量 于开花期和成熟期取植株样品,将茎秆、叶片和小麦穗分开,放入 105°C 烘箱中杀青 30 min, 75°C 烘至恒重,称取干物质量,磨碎,经 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮后用连续流动分析仪 (Auto analyzer 3, 德国 Bran Luebbe 公司) 测定全氮含量。氮素累积吸收量计算公式如下^[15]:

$$TN_A = N_c D_M \quad (2)$$

$$NRA = TN_{UVB} - TN_{UVM} \quad (3)$$

$$NRE = NRA / TN_{UVB} \times 100 \quad (4)$$

$$CGN_{NRE} = NRA / GN_u \times 100 \quad (5)$$

$$PBNU = TN_{UM} - TN_{UVB} \quad (6)$$

式中, TN_A 为各器官氮素累积吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); N_c 为植株各器官含氮率 (%); D_M 为植株各器官地上部干物质量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); NRA 为营养器官氮素转运量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); TN_{UVB} 为开花期营养器官氮素累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); TN_{UVM} 为成熟期营养器官氮素累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); NRE 为营养器官氮素转运率 (%); CGN_{NRE} 为氮素转运对籽粒贡献率 (%); GN_u 为成熟期籽粒氮素累积吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $PBNU$ 为花后氮素吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); TN_{UM} 为成熟期氮素累积吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 小麦产量 冬小麦成熟期,从各小区中选择 1 行 (每行 4 m) 长势均匀的小麦,3 次重复,共计 3 行,测定穗数、穗粒数和千粒重,风干脱粒后测定产量 (籽粒含水量为 14%)。

1.3.4 土壤氮素变化指标计算 土壤氮净矿化 $N_{\min}$

($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、氮素表现损失 N_{loss} ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和氮素盈余 N_{surplus} ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式如下^[16]：

$$N_{\text{min}} = N'_{\text{uptake}} + N'_{\text{residual}} - N'_{\text{initial}} \tag{7}$$

$$N_{\text{loss}} = N_{\text{rate}} + N_{\text{initial}} + N_{\text{min}} - N_{\text{uptake}} - N_{\text{residual}} \tag{8}$$

$$N_{\text{surplus}} = N_{\text{loss}} + N_{\text{residual}} \tag{9}$$

式中, N_{rate} 为施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ; N_{initial} 、 N_{uptake} 和 N_{residual} 分别为施氮土壤初始矿质氮积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、作物氮素吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和收获后土壤残留矿质氮积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ; N'_{initial} 、 N'_{uptake} 和 N'_{residual} 分别为未施氮肥土壤初始矿质氮积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、作物氮素吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和收获后土壤残留矿质氮积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.5 氮素利用指标计算 氮素利用效率 (NUE , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、氮肥偏生产力 ($NPFP$, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和氮素收获指数 (NHI , %) 计算公式如下^[17]：

$$NUE = GY/TN_u \tag{10}$$

$$PFP = GY/N_a \tag{11}$$

$$NHI = GN_u/TN_u \times 100 \tag{12}$$

式中, GY 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ; TN_u 为小麦各器官氮素累积吸收量之和 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ; N_a 为施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ; GN_u 为籽粒氮素累积吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理与分析

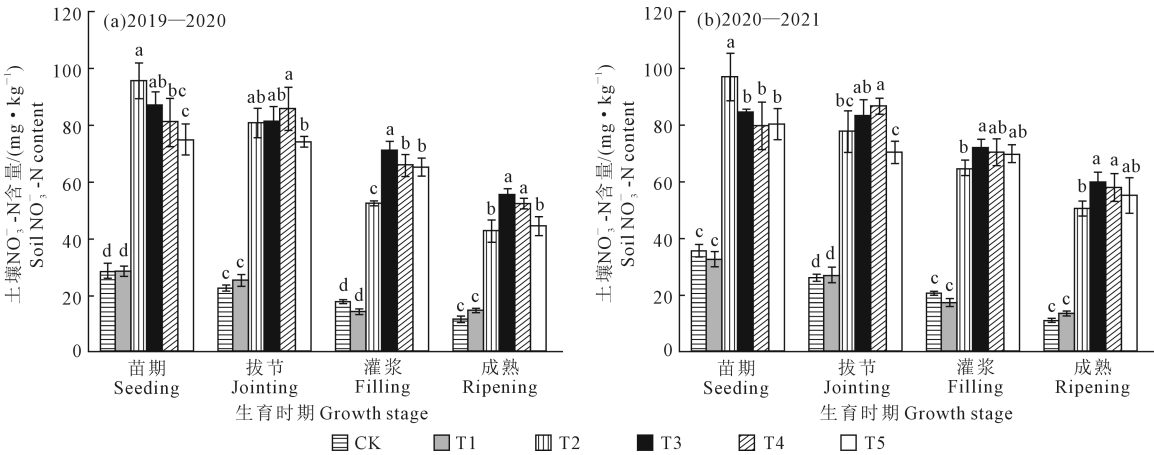
使用 Excel 2016 软件处理试验数据, SPSS 20.0 软件进行方差分析, 多重比较采用 Duncan 新复极差法, 显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。用 Origin 2022b 进行相关性分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 小麦生长季各处理土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量

2019—2020 年度和 2020—2021 年度, 各处理 0~20 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在整个冬小麦生长季呈逐渐下降趋势 (T4 除外), 其中 CK 和 T1 处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量始终处于较低水平 (图 2、图 3)。施用氮肥显著增加了 0~20 cm 土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 且随着缓释尿素施氮量的增加, 各生育时期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈不断增加的趋势 (拔节期除外)。在冬小麦拔节期, T4 处理 0~20 cm 土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量最高, 较其他施氮处理 2 年分别提高 5.3%~16.0% 和 3.8%~23.0%, 但 T4 与 T3 处理间无显著差异。与当地常规施氮量 (T2) 相比, 缓释尿素减施显著降低了苗期 0~20 cm 土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 提高了灌浆期和成熟期 0~20 cm 土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 其中 T4 处理灌浆期和成熟期的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别较 T2 处理提高 17.4% 和 18.8%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别提高 27.1% 和 20.5%。

0~200 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量随着施氮量的增加而增加 (图 4a、b)。缓释尿素处理 (T3、T4 和 T5) 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要集中在 0~40 cm 土层, 常规施氮处理 (T2) 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要集中在 80~160 cm 土层。与 T2 相比, T3 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量显著



注: 不同小写字母表示处理间在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著, 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level among treatments. The same below.

图 2 2019—2020 年度和 2020—2021 年度冬小麦生长季不同施氮处理下 0~20 cm 土层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量

Fig.2 Soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ contents in 0~20 cm soil layer under different nitrogen treatments during winter wheat growing seasons in 2019–2020 and 2020–2021

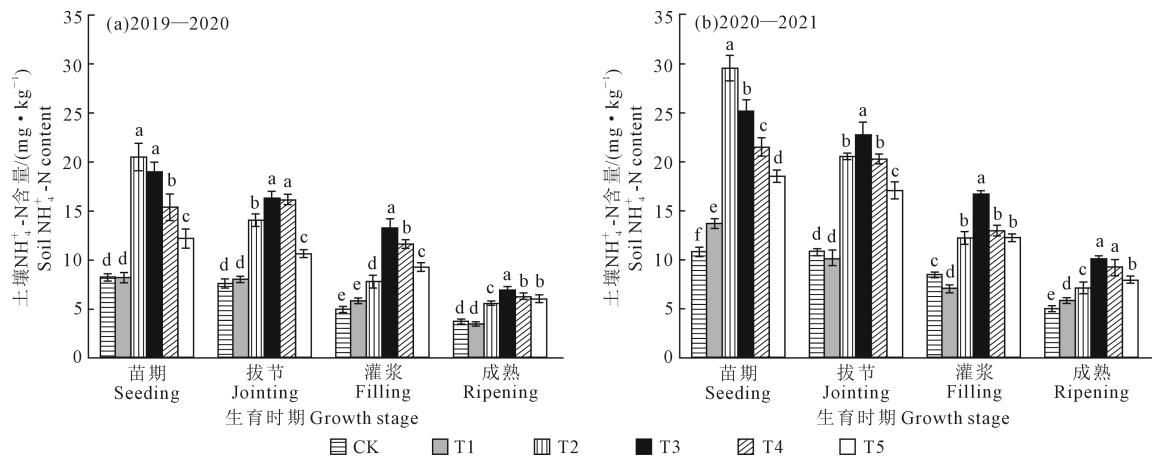


图 3 2019—2020 年度和 2020—2021 年度冬小麦生长季不同施氮处理下 0~20 cm 土层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量

Fig.3 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in 0~20 cm soil layer under different nitrogen treatments during winter wheat growing seasons in 2019–2020 and 2020–2021

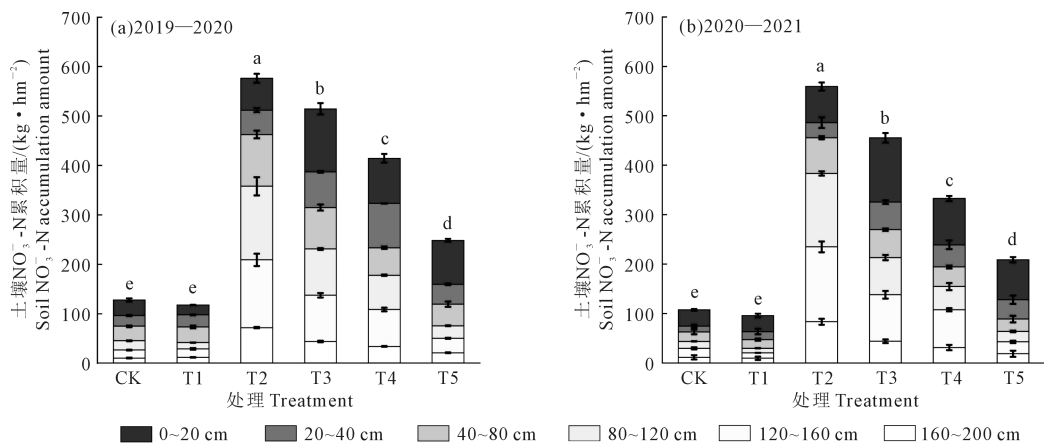


图 4 2019—2020 年度和 2020—2021 年度 0~200 cm 土层土壤硝态氮累积与分布

Fig.4 Soil nitrate nitrogen accumulation and distribution in 0~200 cm soil layer in 2019–2020 and 2020–2021

降低($P < 0.05$)。施肥处理中 0~20 cm 和 0~40 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量均表现为 $\text{T3} > \text{T4} > \text{T5} > \text{T2}$, 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理 0~40 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量 2 a 平均分别增加 77.4%、46.4%和 14.6%。施用缓释尿素显著提高 0~40 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比, T3 处理较 T2 处理平均提高 108.3%, 当缓释尿素施用量降低 35% (T4) 时, 0~40 cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占比较 T2 处理平均提高 123.0%。

2.2 各处理冬小麦植株氮素吸收及转运

施加氮肥显著提高了冬小麦植株的氮素累积吸收量, 其中对籽粒的氮素吸收量提高最为显著 (图 5)。2019—2020 年度和 2020—2021 年度, 施氮处理成熟期冬小麦氮素累积吸收量较不施肥处理 CK 和不施氮处理 T1 分别提高 40.5%~162.9%和 32.1%~186.1%。与当地常规施氮处理 (T2) 相比, T3 处理的氮素累积吸收量在 2019—2020 年度和 2020—2021 年度分别提高 10.0%和 9.0%。随施氮量的增

加, 氮素累积吸收量呈先增后减的变化趋势。两个年份成熟期植株氮素累积量最大的均为 T4 处理, 分别为 $146.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $171.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但其茎和叶的氮素吸收量与 T2 和 T3 处理无显著差异, 籽粒的氮素吸收量分别比 T2 和 T3 处理平均提高 24.7%和 9.5%。

2019—2020 年度和 2020—2021 年度, 施用氮肥显著提高了冬小麦花前营养器官氮素转运量、氮素转运率、花后氮素吸收量和氮素转运对籽粒贡献率 (表 1)。与施用普通尿素相比, 缓释尿素能显著提高氮素转运量和花后氮素吸收量, T3 处理的氮素转运量和花后氮素吸收量较当地常规施氮处理 (T2) 分别提高 12.9%和 13.6%。随着缓释尿素施氮量的增加, 氮素转运量、氮素转运率、花后氮素吸收量和氮素转运对籽粒贡献率呈先增后减的变化趋势, 均在 T4 处理下达到最大, 4 个指标分别较其他施氮处理提高 8.7%~151.2%、2.8%~26.6%、6.2%~73.0%和 0.2%~50.0%。

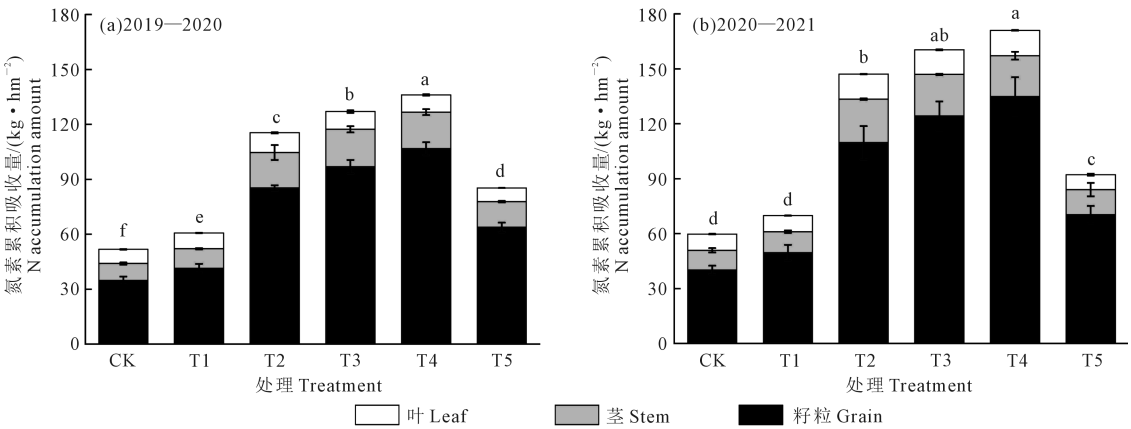


图 5 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下冬小麦成熟期氮素累积吸收量
Fig.5 The amount of nitrogen accumulation in winter wheat under different nitrogen treatments in 2019–2020 and 2020–2021

表 1 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下冬小麦花前营养器官氮素转运和花后氮素吸收

Table 1 Pre-blooming nitrogen remobilization in vegetative organs and post-blooming nitrogen uptake of winter wheat under different nitrogen treatments in 2019–2020 and 2020–2021

年度 Year	处理 Treatment	氮素转运量 N remobilization amount /(kg · hm ⁻²)	氮素 转运率 remobilization efficiency/%	花后氮素 吸收量 Post-blooming N uptake amount /(kg · hm ⁻²)	氮素转运对 籽粒贡献率 Contribution to grain N by N remobilization /%
2019— 2020	CK	10.1f	37.2f	24.7d	28.9d
	T1	14.0e	42.0e	27.4d	33.8c
	T2	48.9c	61.9c	36.4c	57.3a
	T3	56.4b	65.2b	40.4ab	58.2a
	T4	63.8a	68.5a	42.9a	59.8a
	T5	25.4d	54.1d	38.4bc	39.8b
2020— 2021	CK	14.3d	42.2e	25.8e	35.7c
	T1	18.4d	47.5d	31.2d	37.0c
	T2	54.5b	59.2bc	55.2b	49.7a
	T3	60.2a	62.7ab	64.1a	48.4a
	T4	65.5a	64.4a	69.4a	48.5a
	T5	30.2c	58.0c	40.1c	43.0b

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。

Note: Values followed with different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$), the same below.

2.3 各处理冬小麦籽粒产量和净效益

施氮不同程度地提高了冬小麦产量及其构成因素,且 2020—2021 年度籽粒产量高于 2019—2020 年度(表 2)。两个年份施氮处理(T2、T3、T4 和 T5)比不施肥处理 CK 增产 50.3%~164.6%,比不施氮处理 T1 增产 33.5%~102.6%。与当地常规施氮处理(T2)相比,T3 和 T4 处理穗数和穗粒数均有所提

高,T2 和 T3 间差异不显著;T3 和 T4 处理较 T2 处理分别增产 5.6%和 18.5%。两年产量最高的处理均为 T4,分别为 8 434 kg · hm⁻²和 9 060 kg · hm⁻²,2019—2020 年度较 T2 和 T3 处理分别提高19.7%和 13.9%,2020—2021 年度分别提高 17.3%和 10.4%。与 T2 相比,T5 处理的氮肥减量 70%,但 2 a 平均产量仅降低 8.8%。

对冬小麦进行经济效益分析(表 3)可知,施加氮肥增加了冬小麦肥料投入,但提高了冬小麦产值和净效益。与不施肥处理 CK 和不施氮处理 T1 相比,施氮处理(T2、T3、T4 和 T5)的净效益分别提高 84.9%~829.0%和 64.4%~329.5%。两年净效益均为 T4 处理最大,平均分别比 T2、T3 和 T5 处理提高 30.6%、28.3%和 51.7%。综合来看,缓释尿素减量施用(T3,195 kg · hm⁻²)可实现冬小麦高效生产和经济效益的“双赢”。

2.4 各处理冬小麦氮素利用情况

2019—2020 年度和 2020—2021 年度,施氮显著提高了氮素表观损失和氮素盈余量(表 4)。缓释肥处理(T3、T4 和 T5)的氮素表观损失和氮素盈余量均显著低于常规施氮处理(T2),2 a 平均氮素表观损失分别降低 27.6%、105.0%和 553.7%,氮素盈余量分别降低 15.8%、48.5%和 107.9%。随缓释尿素施氮量的降低,冬小麦氮素表观损失和氮素盈余量逐渐下降,与 T3 处理相比,T4 和 T5 的施氮量分别降低 35.0%和 70.0%,2 a 平均氮素表观损失分别降低 48.2%和 82.1%,2 a 平均氮素盈余量分别降低 23.3%和 43.6%。

2019—2020 年度各处理的氮素利用相关指标整体较 2020—2021 年度低,但两个生长季各处理变化规律基本一致(表 5)。缓释肥减施处理(T4 和

T5) 较常规施氮处理 (T2) 提高了氮素利用效率 (*NUE*)、氮肥偏生产力 (*NPFP*) 和氮素收获指数 (*NHI*), *NHI* 下差异显著。两个生长季 *NUE* 和 *NPFP* 均随缓释尿素减施比例的增大而显著提高, T5 处理 *NUE* 较 T3 和 T4 处理平均值两年分别提高 39.9% 和 33.5%, *NPFP* 平均分别提高 187.4% 和 66.8%。 *NHI* 随缓释尿素施氮量的减少呈先增后减的变化趋势, 两年 *NHI* 均在 T4 处理下达到最大, 较 T3 和 T5 处理平均分别提高 2.3% 和 4.0%。

2.5 冬小麦合理施氮量

将冬小麦产量、净效益和 *NHI* 数据归一化处理之后, 可得缓释尿素施氮量与产量、净效益和 *NHI* 的拟合关系 (图 6)。随缓释尿素施氮量的增加, 产量、净效益和 *NHI* 均呈先增加后降低的趋势, 2019—2020 年度和 2020—2021 年度产量、净效益和 *NHI* 分别在图 6 中的 *x* 值下达到最大。当缓释尿素施氮量为 208.7 kg · hm⁻² (*x*₂) 时, 两年 *NHI* 均达到最大值, 分别为 78.2% 和 78.9%, 产量分别为 8 054 kg · hm⁻² 和 8 806 kg · hm⁻², 净效益分别为 6 890 CNY · hm⁻² 和 8 475 CNY · hm⁻²。 2019—2020 年度

表 2 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下冬小麦产量及其构成因素

Table 2 Grain yield and yield components of winter wheat under different nitrogen treatments in 2019–2020 and 2020–2021					
年度 Year	处理 Treatment	穗数 /(穗 · m ⁻²) Spike number /(Spike · m ⁻²)	每穗粒数 Kernels per spike	千粒重/g 1000-kernel weight	籽粒产量 Grain yield /(kg · hm ⁻²)
2019— 2020	CK	242c	31b	42.3e	3187e
	T1	308b	31b	44.3d	4162d
	T2	433a	32b	51.6c	7046b
	T3	456a	30b	53.6b	7404b
	T4	434a	37a	52.3bc	8434a
2020— 2021	T5	333b	33ab	56.3a	6193c
	CK	292c	41b	40.7a	4865f
	T1	303c	48ab	38.1ab	5476e
	T2	378b	55a	37.5ab	7727c
	T3	476a	55a	31.5c	8206b
	T4	489a	54a	34.3bc	9060a
	T5	387b	52a	36.8ab	7310d

表 3 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下冬小麦的经济效益/(CNY · hm⁻²)

Table 3 Economic benefits of winter wheat under different nitrogen treatments in 2019–2020 and 2020–2021							
年度 Year	处理 Treatment	产值 Income	投入 Outcome				净效益 Net benefit
			肥料 Fertilizer	种子 Seed	机械 Mechanics	其他 Other	
2019— 2020	CK	4780.6e	0.0	749.6	1725.0	1500.0	806.0d
	T1	6243.0d	525.0	749.6	1725.0	1500.0	1743.4d
	T2	10568.3b	975.0	749.6	1725.0	1500.0	5618.7b
	T3	11105.9b	1545.0	749.6	1725.0	1500.0	5586.3b
	T4	12650.7a	1188.0	749.6	1725.0	1500.0	7488.1a
2020— 2021	T5	9289.5c	831.0	749.6	1725.0	1500.0	4483.9c
	CK	7588.6e	0.0	730.9	1818.6	1500.0	3539.1c
	T1	8542.4d	513.0	730.9	1818.6	1500.0	3980.0c
	T2	12053.7c	963.0	730.9	1818.6	1500.0	7041.2b
	T3	12801.2b	1503.0	730.9	1818.6	1500.0	7248.8b
	T4	14133.1a	1156.5	730.9	1818.6	1500.0	8927.1a
	T5	11404.1c	810.0	730.9	1818.6	1500.0	6544.7b

注: 2019—2020 年度和 2020—2021 年度小麦价格分别为 1.50 CNY · kg⁻¹ 和 1.56 CNY · kg⁻¹; 肥料包括尿素 (1.5 CNY · kg⁻¹)、硫包衣尿素 (2019—2020 年度 3.4 CNY · kg⁻¹、2020—2021 年度 3.3 CNY · kg⁻¹)、过磷酸钙 (2019—2020 年度 1.0 CNY · kg⁻¹、2020—2021 年度 0.9 CNY · kg⁻¹) 和硫酸钾 (3.0 CNY · kg⁻¹); 2019—2020 年度和 2020—2021 年度种子价格分别为 4.0 CNY · kg⁻¹ 和 3.9 CNY · kg⁻¹; 机械包括犁耕 (2019—2020 年度 975.0 CNY · hm⁻²、2020—2021 年度 1 027.9 CNY · hm⁻²) 和收割 (2019—2020 年度 750.0 CNY · hm⁻²、2020—2021 年度 790.7 CNY · hm⁻²); 其他包括播种、除草、病虫害防治。

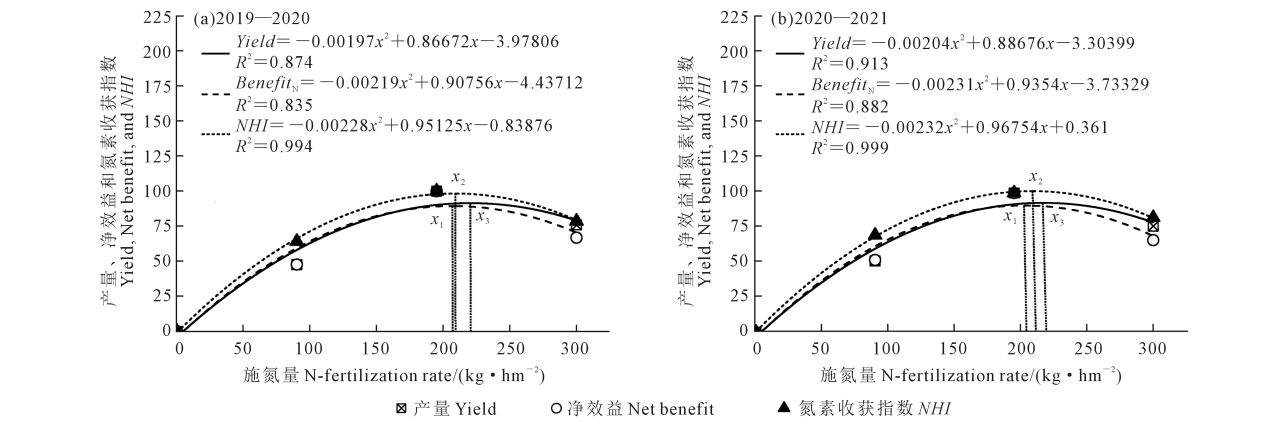
Note: Wheat is 1.50 CNY · kg⁻¹ and 1.56 CNY · kg⁻¹ in 2019–2020 and 2020–2021 seasons, respectively; fertilizer included urea (1.5 CNY · kg⁻¹), sulfur-coated urea (3.4 CNY · kg⁻¹ in 2019–2020, 3.3 CNY · kg⁻¹ in 2020–2021), calcium superphosphate (1.0 CNY · kg⁻¹ in 2019–2020, 0.9 CNY · kg⁻¹ in 2020–2021), and potassium sulphate (3.0 CNY · kg⁻¹); seed is 4.0 CNY · kg⁻¹ and 3.9 CNY · kg⁻¹ in 2019–2020 and 2020–2021 seasons; mechanics included plough (975.0 CNY · hm⁻² in 2019–2020, 1 027.9 CNY · hm⁻² in 2020–2021) and harvest (750.0 CNY · hm⁻² in 2019–2020, 790.7 CNY · hm⁻² in 2020–2021); other included sowing, weed and pest control.

表 4 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下 0~100 cm 土层土壤氮素变化指标/(kg·hm⁻²)

Table 4 Soil nitrogen transformation in 0~100 cm soil layer under different nitrogen treatments in 2019-2020 and 2020-2021								
年度 Year	处理 Treatment	N_{rate}	$N_{initial}$	N_{min}	N_{uptake}	$N_{residual}$	N_{loss}	$N_{surplus}$
2019— 2020	CK	0	297.3e	-50.4	51.8f	165.7e	29.5e	195.2e
	T1	0	249.5f	-50.4	60.8e	138.4f	0.0f	138.4f
	T2	300	467.9a	-50.4	115.4c	448.6a	153.5a	602.1a
	T3	300	390.8b	-50.4	127.0b	413.6b	99.8b	513.4b
	T4	195	388.7c	-50.4	136.1a	321.7c	75.4c	397.2c
2020— 2021	T5	90	355.6d	-50.4	85.3d	277.5d	32.4d	309.9d
	CK	0	364.0d	-57.4	59.8d	163.5e	83.3ab	246.8d
	T1	0	274.3f	-57.4	69.9d	147.1e	0.0d	147.1e
	T2	300	426.4a	-57.4	147.2b	417.6a	104.2a	521.8a
	T3	300	374.3c	-57.4	160.4ab	353.7b	102.8a	456.5b
	T4	195	392.0b	-57.4	171.1a	308.0c	50.5bc	358.6c
	T5	90	295.3e	-57.4	92.3c	223.2d	12.5cd	235.6d

表 5 2019—2020 年度和 2020—2021 年度不同施氮处理下冬小麦氮素利用情况

Table 5 Nitrogen utilization of the winter wheat under different nitrogen treatments in 2019-2020 and 2020-2021				
年度 Year	处理 Treatment	NUE /(kg·kg ⁻¹)	$NPFP$ /(kg·kg ⁻¹)	$NHI/\%$
2019— 2020	CK	61.7b		67.2c
	T1	68.6a		68.1c
	T2	61.1b	23.5c	74.0b
	T3	58.3b	24.7c	76.2ab
	T4	62.0b	43.3b	78.4a
2020— 2021	T5	72.6a	68.8a	74.7b
	CK	81.5a		67.1d
	T1	78.5a		70.9c
	T2	52.7b	25.8c	74.4b
	T3	51.3b	27.4c	77.4ab
	T4	53.2b	46.5b	78.8a
	T5	79.7a	81.2a	76.4ab



注:图中 x 为各曲线 y 值达到最大值时所对应的施氮量。
Note: The x in the figure represents the nitrogen application rate corresponding to the maximum value of y in each fitting curve.

图 6 2019—2020 年度和 2020—2021 年度缓释氮肥施氮量与冬小麦产量、净效益和氮素收获指数的拟合关系

Fig.6 The fitting relationship between slow-release nitrogen application rate and winter wheat yield, net benefit and nitrogen harvest index during 2019-2020 and 2020-2021

和 2020—2021 年度, x_2 下的净效益较 x_3 分别增加 0.3% 和 0.2%, 但产量仅降低 0.1%, 与 x_1 相比, x_2 下的产量略有增加, 且净效益仅降低不足 0.1%。综合考虑两年冬小麦产量、净效益和 NHI , 冬小麦高产高效生产的缓释氮肥施用量为 208.7 kg·hm⁻²。

3 讨论

3.1 缓释尿素减施对冬小麦产量和净效益的影响

氮肥的合理供应是协调单位面积穗数、穗粒数和粒重之间关系, 实现小麦增产增收的重要途径^[18]。充足的氮素供应有利于小麦生育前期形成壮苗; 在快速生长的拔节期, 氮素供应促进分蘖成穗, 增加穗粒数; 小麦生育中后期, 维持一定的氮素水平能够增加光合产物积累, 促进粒重增长^[19]。与普通尿素相比, 缓释尿素能有效控制氮素释放, 使

氮素释放速率与作物的养分吸收速率紧密匹配, 有利于小麦群体建设和产量形成^[20-21]。本研究结果表明, 当地常规施氮处理的土壤硝态氮和铵态氮含量在苗期高于缓释尿素处理, 主要是由于尿素的快速水解特性使播期施肥后大部分氮素在返青前释放, 虽然土壤中的无机氮含量在苗期保持较高水平, 满足了分蘖~越冬期的氮需求高峰, 但多余的氮在苗期无法被植株吸收, 氮淋失的风险增加, 同时无法满足拔节后期小麦对氮素的需求^[22]。缓释尿素稳定的氮素释放量基本能满足小麦生育前期对氮素的需求, 拔节~成熟期缓释尿素处理 (T3 和 T4) 始终保持较高的无机氮水平 (图 2、图 3), 更好地满足了小麦在第二次氮需求高峰期间 (拔节~开花期) 的氮吸收要求^[23], 缓释尿素的氮素释放周期与冬小麦的生长周期相匹配, 能显著增强植株对氮

素的吸收能力,有利于增产。本研究结果发现,300 kg·hm⁻²施氮量下,缓释尿素处理显著改善了产量构成因素,与常规施氮处理相比,产量显著提高 5.1%~6.2%。马富亮等^[24]研究也发现缓释尿素相较于普通尿素能促进小麦生长发育,同时提高穗数、穗粒数和千粒重,与本研究结果一致。在 0~300 kg·hm⁻²缓释尿素施用量范围内,冬小麦产量随缓释尿素施氮量的增加呈先增加后降低的变化趋势,表明在 300 kg·hm⁻²的基础上,减施缓释氮肥具有提高作物产量的巨大潜力^[25]。2019—2020 年度,由于苗期降水不均和干旱胁迫,小麦种子的萌发和活力受到限制,同时影响了养分释放和氮吸收,产量不及 2020—2021 年度;而 2020—2021 年度充足的降雨增加了土壤水分和养分的有效性,产量较上年度整体有所提升^[26]。2019—2020 年度,T3 处理的产量与当地常规施氮处理(T2)处理无显著差异,但前者仍高于后者,表明即使在相对干旱的条件下,缓释尿素的氮释放仍可满足作物生长所需^[27]。成本效益分析结果表明,缓释尿素减施处理(T4 和 T5)的净效益优于当地常规施氮处理(T2),表明在施氮量减少的条件下,缓释尿素的经济效益能有效弥补其因肥料施用而增加的成本^[28]。当缓释尿素处理的施氮量为 300 kg·hm⁻²和 90 kg·hm⁻²时,净效益相对较低(表 3),主要原因是氮肥施用量过低导致产量低,影响产值增加;而过量施用氮肥不仅降低了冬小麦产量,还增加了肥料成本,从而导致经济效益降低^[29]。缓释尿素的施用量减少 35%有效地减少氮损失,并获得了最大产量。同时,通过减少缓释尿素的施用量,有效控制了化肥成本,最终实现了两年平均净效益的最大化。可见,减少缓释尿素的施用量是提高作物产量和经济效益的有效途径。

3.2 缓释尿素减施对冬小麦氮素吸收利用的影响

缓释尿素能够延缓氮素释放速率,延长释放周期,在一定程度上达到氮肥肥效后移的效果,有利于增加植株开花期和成熟期氮素吸收量和花后氮素吸收量,促进营养器官氮素向籽粒的转运,提高氮肥的吸收与利用效率^[30]。本研究结果表明,与当地常规施氮处理(T2)相比,施用缓释尿素显著促进了小麦氮素转运和花后氮素累积,氮素累积吸收量、籽粒氮素吸收量和氮素收获指数分别提高 9.0%~10.0%、13.3%~13.5%和 3.1%~4.0%,与马泉等^[18]对小麦氮素吸收和转运的研究结论相同。施氮措施对作物氮素吸收转运影响显著,过量施氮不仅降低营养器官氮素转运量、氮素转运率及其在籽粒中的分配比例,影响作物源库关系的协调性,还

造成了资源浪费^[31]。本研究发现,与 100%缓释尿素处理相比,缓释尿素减量 35%后,氮素转运量、花后氮素吸收量和氮素转运对籽粒贡献率反而有所提高。所以合理的氮肥运筹有利于协调小麦的氮素吸收,增加小麦的氮素累积^[32]。

氮素利用效率、氮肥偏生产力和氮素收获指数是反映作物对土壤中氮肥吸收与利用效应的重要指标,氮肥施用量及运筹对氮肥利用率均有显著影响。与当地常规施氮处理(T2)相比,缓释尿素处理(T3、T4 和 T5)提高了氮素利用效率、氮肥偏生产力和氮素收获指数,主要是因为缓释氮肥提高了作物氮需求和氮供应的同步性^[33-34],避免了过量的无机氮转化为气态氮排放和氮肥养分下移的情况^[35];同时缓释氮肥中的包膜外壳带入硫元素,其作为植物生长所需的第四大营养元素,有效补充了营养,促进作物生长,硫氮的结合显著提高了氮素利用率^[36]。本研究结果表明,T2 和 T3 处理间的氮素利用效率、氮肥偏生产力和氮素收获指数未表现出显著差异,可能是因为适宜的水热条件导致缓释尿素提前释放,一定程度上影响了氮素利用效率。本研究还发现,各处理氮素吸收量显著小于收获后土壤矿物氮累积量,且作物氮素吸收量随着施氮量的增加呈先增加后降低的变化趋势,导致土壤矿物氮累积量和氮素表观损失显著增加,矿质氮渗入深层土壤的风险也显著提高,氮肥利用效率显著降低^[37-38]。巨晓棠等^[39]研究结果也表明,随着施氮量的增加,氮素吸收效率和氮肥偏生产力持续降低,这与本研究的结果一致。当缓释尿素的施用量减少 70%时,氮肥利用效率虽然有所提高,但由于氮素供应不足,冬小麦氮素累积吸收量和产量显著降低。本研究中,2020—2021 年度各处理的氮素收获指数高于 2019—2020 年度,这可能是因为 2020—2021 年度拔节~灌浆期充沛的降水补充了土壤水分,缓解了季节性干旱造成的土壤水分亏缺和养分流动障碍^[40],促进养分向穗部运输,穗部氮积累比例显著增加,导致 *NHI* 升高。2020—2021 年度植株氮素转运量和花后氮素吸收量较上年度提高,有利于延缓小麦生长后期衰老,提高籽粒产量和氮素利用率。结合缓释氮肥施氮量与冬小麦产量、净效益和氮素收获指数的拟合结果,缓释尿素施用量为 208.7 kg·hm⁻²可实现冬小麦高效生产。本文主要综合考虑冬小麦的土壤硝态氮分布、氮素累积吸收与转运、产量和氮素利用效率,确定了最优的缓释氮肥施用量,关于不同缓释尿素施氮量下氮挥发以及温室气体的同步减排还需进一步研究。

4 结 论

1) 缓释尿素减施可显著降低 0~200 cm 土层土壤 NO_3^- -N 累积量, 并提高 0~40 cm 土层 NO_3^- -N 的占比。与当地常规施氮处理相比, 缓释尿素减施处理 ($195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 缓释尿素 N) 0~40 cm 土层土壤 NO_3^- -N 含量分别增加 46.4% 和 14.6%。

2) 与施用普通尿素相比, 施加缓释尿素能显著提高冬小麦植株氮素转运量和花后氮素吸收量。氮素转运量、氮素转运率、花后氮素吸收量和氮素转运对籽粒贡献率均在缓释尿素减施 35% 处理下达到最大, 4 个指标分别较其他施氮处理提高 8.7%~151.2%、2.8%~26.6%、6.2%~73.0% 和 0.2%~50.0%。

3) 2019—2020 年度和 2020—2021 年度缓释尿素施用量为 $208.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量分别为 $8\,054 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8\,806 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 净效益分别为 $6\,890 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8\,475 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$, NHI 分别为 78.2% 和 78.9%, 是西北旱区冬小麦高产高效的缓释氮肥施用量。

参 考 文 献:

- [1] 高仁才, 陈松鹤, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与减氮优化根系分布提高冬小麦产量及水氮利用效率[J]. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2709-2725.
GAO R C, CHEN S H, MA H L, et al. Straw mulching from autumn fallow and reducing nitrogen application improved grain yield, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat by optimizing root distribution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(14): 2709-2725.
- [2] 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.
- [3] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对小麦氮素利用及经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 214-220.
LI C X, LIU Q, SHAO Y, et al. Effects of organic materials returning and nitrogen fertilizer reduction on nitrogen utilization and economic benefits of wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 214-220.
- [4] 王新媛, 赵思达, 郑险峰, 等. 秸秆还田和氮肥用量对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5043-5053.
WANG X Y, ZHAO S D, ZHENG X F, et al. Effects of straw returning and nitrogen application rate on grain yield and nitrogen utilization of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(23): 5043-5053.
- [5] LI C J, XIONG Y W, HUANG Q Z, et al. Impact of irrigation and fertilization regimes on greenhouse gas emissions from soil of mulching cultivated maize (*Zea mays* L.) field in the upper reaches of Yellow River, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120873.
- [6] 范靖尉, 白晋华, 任寰宇, 等. 减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 121-130.
FAN J W, BAI J H, REN H Y, et al. Effects of reducing nitrogen and biochar application on CO_2 and N_2O emissions from summer maize-winter wheat field in North China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,

- 2016, 37(2): 121-130.
- [7] GAO X, LI C L, ZHANG M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil[J]. Field Crops Research, 2015, 181: 60-68.
- [8] 王玉凤, 武鹏, 李庆, 等. 缓释与普通尿素分层配施对土壤氮素和玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 118-126.
WANG Y F, WU P, LI Q, et al. Combined effects of slow-release and common urea application at different depths on soil nitrogen and maize growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 118-126.
- [9] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5): 859-870.
PENG Y, SUN Y J, JIANG M J, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(5): 859-870.
- [10] ZHANG W S, LIANG Z Y, HE X M, et al. The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: a meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2019, 246: 559-565.
- [11] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 162-167, 174.
ZHENG W K, LI C L, DOU X X, et al. Effects of different types of controlled release urea on wheat yield and biochemical properties of soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 162-167, 174.
- [12] 张晨阳, 张富仓, 郭金金, 等. 缓释氮肥与尿素掺施比例对冬小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 669-680.
ZHANG C Y, ZHANG F C, GUO J J, et al. Effects of blending ratios of slow-release nitrogen fertilizer and urea on yield and nitrogen uptake of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 669-680.
- [13] ZHENG W K, ZHANG M, LIU Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62.
- [14] XIA L L, LAM S K, CHEN D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [15] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 484-490.
ZHAO J Y, YU Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 484-490.
- [16] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [17] GUO Z J, ZHANG Y L, ZHAO J Y, et al. Nitrogen use by winter wheat and changes in soil nitrate nitrogen levels with supplemental irrigation based on measurement of moisture content in various soil layers [J]. Field Crops Research, 2014, 164: 117-125.
- [18] 马泉, 蒋文月, 张新钵, 等. 硫包膜缓释肥运筹方式对强筋小麦氮素积累转运、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(8):

- 148-157.
- MA Q, JIANG W Y, ZHANG X B, et al. Effect of sulfur coated slow-released fertilizer managements on nitrogen accumulation and translocation, yield and quality of strong gluten wheat[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(8): 148-157.
- [19] 郑沛, 宋付朋, 马富亮. 硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 122-127.
- ZHENG P, SONG F P, MA F L. Influence of controlled release urea coated by sulfur and polymer on soil nitrogen in different growth stages of wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 122-127.
- [20] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 不同控氮比掺混肥对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 159-164.
- ZHANG J S, LI B, WANG C Q, et al. Effects of bulk blend fertilizers with different controlled nitrogen ratios on the soil inorganic nitrogen, urease and winter wheat yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 159-164.
- [21] TANG L, LI S Q, SHEN Y F. Response of maize yield and nitrogen leaching to combining controlled-release urea and normal urea under different surface mulching[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(13): 5520-5528.
- [22] MA Q, WANG M Y, ZHENG G L, et al. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2021, 267: 108163.
- [23] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 177-184.
- FENG A Q, ZHANG M, LI C L, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil enzyme activities and soil nutrient utilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 177-184.
- [24] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 67-72.
- MA F L, SONG F P, GAO Y, et al. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 67-72.
- [25] ZHENG W K, SUI C L, LIU Z G, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems [J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(4): 1703-1716.
- [26] LI C J, WEN A A, WAN X J, et al. Towards the highly effective use of precipitation by ridge-furrow with plastic film mulching instead of relying on irrigation resources in a dry semi-humid area[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 62-73.
- [27] GENG J B, MA Q, ZHANG M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 9-16.
- [28] FAN D J, WANG X X, SONG D P, et al. Optimizing nitrogen management to mitigate gaseous losses and improve net benefits of an open-field Chinese cabbage system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115583.
- [29] 张德军. 施氮对春玉米产量和经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2010, (2): 83-85.
- ZHANG D J. Effects of applying nitrogen fertilizer on yield and economic benefits of spring maize[J]. *Crops*, 2010, (2): 83-85.
- [30] 代新俊, 夏清, 杨珍平, 等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 289-294.
- DAI X J, XIA Q, YANG Z P, et al. Effects of postponing nitrogen application on accumulation and transport of nitrogen and yield and quality of grain in strong-gluten wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 289-294.
- [31] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622-627.
- ZHAO Y, TONG Y A, ZHAO H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5): 622-627.
- [32] 丁锦峰, 杨佳凤, 王云翠, 等. 稻茬小麦公顷产量 9000 kg 群体氮素积累、分配与利用特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 543-551.
- DING J F, YANG J F, WANG Y C, et al. Nitrogen accumulation, distribution and utilization characteristics of wheat at yield level of 9000 kg/ha in rice-wheat rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 543-551.
- [33] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3930-3943.
- GUO J J, ZHANG F C, WANG H D, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3930-3943.
- [34] GRANT C A, WU R, SELLES F, et al. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 170-180.
- [35] 朱晓霞, 谭德水, 江丽华, 等. 减量施用控释氮肥对小麦产量效率及土壤硝态氮的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(1): 179-183.
- ZHU X X, TAN D S, JIANG L H, et al. Effect of reducing amount of controlled release N fertilizer on yield of winter wheat, N efficiency and soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(1): 179-183.
- [36] BEATON J D, 樊明宪. 影响硫包衣的硫元素来源之效用的因素[J]. *中国农资*, 2005, (10): 68-69.
- BEATON J D, FAN M X. Factors affecting the effectiveness of sulfur sources for sulfur coating [J]. *Agrochemical Science & Technology*, 2005, (10): 68-69.
- [37] WEI C Z, MA T F, WANG X J, et al. The fate of fertilizer N applied to cotton in relation to irrigation methods and N dosage in arid area[J]. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(3): 320-329.
- [38] 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. Effects of reducing nitrogen application rate on the yields of three major cereals in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(24): 4863-4878.
- [39] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤剖面的累积及移动[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 538-546.
- JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Accumulation and movement of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 538-546.
- [40] 冯军, 石超, HUSSAIN H A, 等. 不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4322-4332.
- FENG J, SHI C, HUSSAIN H A, et al. Effects of mulching and slow-release fertilizer application reduction on soil microbial community structure in rapeseed field under two different rainfall conditions [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4322-4332.