· 农业水土工程 ·

优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率

谷晓博，宋 慧，白东萍，杜娅丹，常 甜，卢识宇，蔡文璟

（1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，杨凌 712100；2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，杨凌 712100）

摘 要：为探究匹配冬小麦氮素需求规律的最佳缓释氮肥与尿素配施比例，优化施肥结构，达到氮肥高效利用与经济效益“双赢”的目标，该研究以冬小麦为研究对象，通过 2 a（2019—2020 年和 2020—2021 年）田间试验，设置 7 个施肥处理：仅施尿素（U）、仅施缓释氮肥（S）、缓释氮肥与尿素 1:3 配施（SU1）、缓释氮肥与尿素 1:1 配施（SU2）、缓释氮肥与尿素 3:1 配施（SU3）、不施氮肥（N0）和不施肥（CK），研究缓释氮肥配施比例对冬小麦干物质积累和转运、产量和氮肥利用效率的影响。结果表明，冬小麦干物质快速生长期和最大累积速率随缓释氮肥配施比例的增加而增加，缓释氮肥与尿素配施的冬小麦干物质平均累积速率比普通尿素提高 1.90%～19.91%。缓释氮肥与尿素配施可在改善花前干物质转运量的同时提高花后生产量，花后干物质生产量对籽粒贡献率达 53.18%～71.83%。产量随缓释氮肥配施比例的增加而显著提高，SU3 处理 2 a 产量分别为 7 243 和 8 021 kg/hm^2，较 S 和 U 处理分别提高了 7.25% 和 16.07%，其经济效益较 S 和 U 处理提高了 15.18% 和 25.67%。与仅施尿素相比，缓释氮肥与尿素配施可显著提高氮肥利用效率，但 SU2 和 SU3 处理无显著差异（P>0.05）。综合考虑，在施氮量 180 kg/hm^2 条件下，缓释氮肥与尿素配施比例 50%（SU2），可实现冬小麦绿色高产高效，其产量为 7 458 kg/hm^2，氮肥吸收利用效率为 45.97%，农学利用效率、生理利用效率和偏生产力分别为 16.07、30.49 和 42.09 kg/kg。该研究可为冬小麦合理施肥提供理论依据。

关键词：氮；尿素；肥；小麦；Logistic 方程；花后干物质生产量；氮肥利用效率；产量

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202212136

中图分类号：S512.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2023)-11-0056-10

谷晓博，宋慧，白东萍，等. 优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率[J]. **农业工程学报**，2023，39(11)：56-65. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212136 http://www.tcsae.org

GU Xiaobo, SONG Hui, BAI Dongping, et al. Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 56-65. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212136 http://www.tcsae.org

0 引 言

小麦是中国主要粮食作物之一，其高产稳产对保障中国粮食安全有重要意义[1]。氮是提高小麦产量的主要元素，作物需要充足的氮才能获得更高的经济产量，施氮量的多少必须与作物的需求相适应[1-2]。普通氮肥施用后土壤养分浓度在短时间内过高，加大了挥发损失和渗漏的风险，且土壤养分供应与作物养分需求不同步，导致作物难以获取充足的养分[3]。与普通尿素相比，缓释氮肥高效且环境友好，可促进作物生长和氮素吸收，提高产量和氮肥利用效率[4]，并对玉米、马铃薯等生育期较短的作物具有显著增产提效作用[5-6]。缓释氮肥前期释放较慢，可能会导致作物生育前期供氮不足，且冬小麦生育期较长，仅施用缓释氮肥难以保证冬小麦全生育期充足的氮素供应[7]；而且单施缓释氮肥成本较高。为调整和优化施肥结构，提高氮肥利用效率。开展缓释氮肥与尿素配施对作物生长及氮素吸收的研究[8-10]，寻求提高肥料利用效率和经济效益的“双赢”施肥模式，对农业高效生产，实现绿色可持续发展具有重要意义。

很多学者在对作物生长研究中发现，在干旱和半干旱气候条件下，缓释氮肥与尿素配施可提高作物产量[11]，降低施肥成本[12]。ZHENG 等[13] 研究表明，混施缓释氮肥和尿素后，小麦产量提高 7.9%～10.3%。另外，缓释氮肥与尿素的不同配施比例也会对作物产量和氮肥利用效率产生不同影响。ZHANG 等[14] 研究表明，缓释氮肥占比为 20%～40% 时冬小麦产量最高，较常规施肥氮素利用率提高 14.21%～29.89%；但 FAN 等[15] 研究发现，缓释氮肥与尿素混施占比 75% 时冬小麦产量最高，较尿素处理产量、氮素利用效率和经济效益提高了 12.2%、9.7% 和 19.1%。前人关于缓释氮肥与尿素最佳配施比例的研究结果不尽一致，且主要集中于对作物产量和水肥利用效率的影响，而关于缓释氮肥和尿素配施对作物产量形成的调控机制尚不明晰。

因此，本研究在前人研究成果的基础上，进一步研究不同缓释氮肥和尿素配施比例对冬小麦干物质累积及转运、作物产量和氮素吸收利用效率等方面的影响，目的在于：1）揭示缓释氮肥和尿素配施对冬小麦产量的影响机制；2）确定冬小麦高产高效生产的缓释氮肥与尿素

收稿日期：2022-12-18 修订日期：2023-04-04

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD1900700）

作者简介：谷晓博，博士，教授，研究方向为农业节水理论与技术、农业水肥资源高效利用与调控。Email：guxiaobo@nwafu.edu.cn

最佳配施比例，优化冬小麦施肥模式，以期为冬小麦绿色高效生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况及试验材料

2019－2020 年和 2020－2021 年 2 a 冬小麦田间试验在陕西省杨陵区西北农林科技大学农业水土工程教育部重点实验室节水灌溉试验站（108°24′E，34°17′N）进行，该区属暖温带季风半湿润气候区，海拔 521 m，多年平均气温 13 ℃，多年平均降水量 632 mm，年平均蒸发量 1 500 mm。

试验地土壤质地为中壤土，田间持水率 23%～25%（质量含水率），平均干容重 1.42 g/cm^3。耕层土壤（0～30 cm）pH 值约 7.92，基础肥力（质量比）如下：有机质 18.2 g/kg，硝态氮 68.71 mg/kg，速效磷 21.45 mg/kg，速效钾 156.96 mg/kg。2019—2020 年和 2020—2021 年冬小麦生育期内总降水量分别为 149.5 和 185.2 mm，平均气温为 9 和 9.1 ℃，逐日平均气温和降雨量动态变化如图 1 所示。

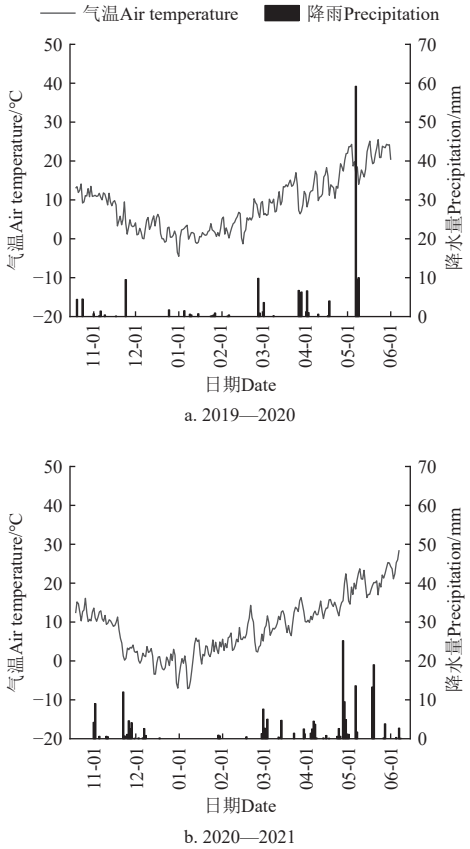

图 1　2019—2021 年冬小麦生育期内日平均气温和日降水量

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

供试小麦品种为“小偃 22”。试验所用缓释氮肥为硫包衣尿素，由江苏泰州汉枫缓释肥料有限公司生产（其缓释曲线如图 2 所示），含氮量不小于 37%，释放期[16]为 90 d。硫包衣尿素相比于其他树脂包膜缓释肥料具有抑制氮素损失、供硫+氮硫互促、以及疏松土质，缓解土壤板结，改良土壤的优势[4]。

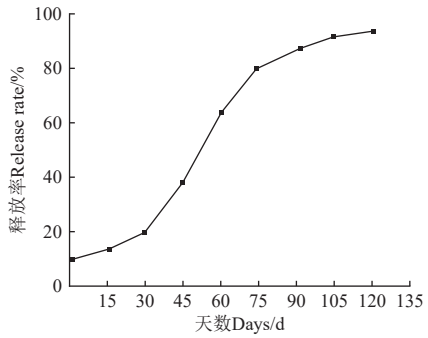

图 2　硫包衣尿素（SCU）的缓释曲线

Fig.2　Slow-release curves for sulfur-coated urea (SCU)

1.2　试验设计

试验包括不施肥（CK）、不施氮肥（N0）、仅施尿素（U）、仅施缓释氮肥（S）、缓释氮肥与尿素 1:3 配施（SU1）、缓释氮肥与尿素 1:1 配施（SU2）、缓释氮肥与尿素 3:1 配施（SU3）7 个施肥处理（表 1），每个处理重复 3 次，共 21 个试验小区，小区随机排列，面积 16 m^2（4 m×4 m），小区周围布设 0.5 m 保护带。关中地区施氮量 180 kg/hm^2 是冬小麦适宜的推荐施肥量[17]，各小区氮肥、磷肥（120 kg/hm^2，以 P_2O_5 计）和钾肥（135 kg/hm^2，以 K_2O 计）均作为基肥施入。2 a 冬小麦播种量 187.5 kg/hm^2，行距 20 cm，分别于 2019 年 10 月 18 日和 2020 年 10 月 20 日播种，2020 年 6 月 5 日和 2021 年 6 月 7 日收获。

表 1　各处理设计

Table 1　Design of different treatments

处理 Treatment	缓释氮肥与尿素比例 Ratio of slow-release N fertilizer to urea	施肥量 Fertilizer application rate/(kg·hm^{-2})			
		普通氮肥 Common N fertilizer	缓释氮肥 Slow-release N fertilizer	磷肥 Phosphorus fertilizer	钾肥 Potassium fertilizer
CK	–	–	–	–	–
N0	–	0	0	120	135
U	–	180	–	120	135
S	–	–	180	120	135
SU1	1:3	135	45	120	135
SU2	1:1	90	90	120	135
SU3	3:1	45	135	120	135

注：试验所用普通氮肥为尿素（N≥46%），缓释氮肥为硫包衣尿素（N≥37%），磷肥为过磷酸钙（P_2O_5≥16%），钾肥为硫酸钾（K_2O≥51%）。

Note: The common nitrogen fertilizer used in the experiment is urea(N≥46%), slow-release nitrogen fertilizer is sulfur coated urea (N≥37%), phosphorus fertilizer is superphosphate (P_2O_5≥16%), and potassium fertilizer is potassium sulfate (K_2O≥51%).

1.3　测定项目与计算方法

1.3.1　干物质累积量

于苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期在每个小区选取长势均匀且具有代表性的 10 株小麦（苗期和拔节期植株较小，选取 15 株），将茎秆、叶片、麦穗分开，放入干燥箱 105 ℃ 杀青 30 min 后，75 ℃ 干燥至恒质量，冬小麦地上部干物质总量为各器官干物质量之和。

花前营养器官干物质向籽粒转运量为开花期营养器官干物质积累量与成熟期营养器官干物质积累量的差值，kg/hm^2；花前营养器官干物质转运量对籽粒产量贡献率为花前营养器官干物质向籽粒转运量占籽粒产量的比

例，%；花后干物质生产量为籽粒产量与花前营养器官干物质向籽粒转运量的差值，kg/hm^2；花后干物质生产量对籽粒产量贡献率为花后干物质生产量占籽粒产量的比例，%。

1.3.2 产 量

于冬小麦成熟期在每小区中间选取单行 4 m 长的小麦植株，晒干脱粒称质量，取部分籽粒烘干测其含水率，并测定穗长、穗行数、穗粒数、单穗籽粒质量和千粒质量。

1.3.3 氮素累积吸收量

冬小麦地上部植株经小型粉碎机粉碎，过 0.5 mm 筛，用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮后通过连续流动分析仪（Auto Analyzer-Ⅲ型，德国 Bran Luebbe 公司）测定植株体内各个组织器官全氮含量。氮素吸收总量为各个器官氮素吸收量之和。氮素累积量（T_N），其计算式如下：

$$T_N = N_C D_M \tag{1}$$

式中 N_C 为植株含氮率，%；D_M 为植株地上部干物质累积量，kg/hm^2。

1.3.4 经济效益

产值为产量与单价的乘积，元/hm^2；净效益为产值与总投入的差值，元/hm^2。小麦单价按当年当季的收购价计算。2019—2020 年和 2020—2021 年小麦收购价分别为 1.50 和 1.56 元/kg。总投入包括肥料、种子、种植、收获和其他成本。用工标准和生产资料价格依据试验点当地当年用工及物价水平确定。肥料包括尿素（1.5 元/kg）、硫包衣尿素（2019—2020 年和 2020—2021 年分别为 3.4、3.3 元/kg）、过磷酸钙（2019—2020 年和 2020—2021 年分别为 1.0、0.9 元/kg）、硫酸钾（3.0 元/kg）；种子（2019—2020 年和 2020—2021 年单价分别为 4.0、3.9 元/kg）；种植包括旋耕（2019—2020 年和 2020—2021 年分别为 975 和 1 027.9 元/hm^2）；收获按 750 元/hm^2 计算；其他包括播种、杂草和害虫防治（1 500 元/hm^2）。

1.3.5 氮肥利用效率

氮肥农学利用效率（S_N）、氮肥生理利用效率（S_P）、氮肥吸收利用效率（S_R）和氮肥偏生产力（S_F）的计算式如下：

$$S_N = \frac{Y_N - Y_0}{E_N} \tag{2}$$

$$S_P = \frac{Y_N - Y_0}{T_N - T_0} \tag{3}$$

$$S_R = \frac{T_N - T_0}{E_N} \times 100 \tag{4}$$

$$S_F = \frac{Y_N}{E_N} \tag{5}$$

式中 Y_N 为施氮处理籽粒产量，kg/hm^2；Y_0 为不施氮处理籽粒产量，kg/hm^2；E_N 为施氮量，kg/hm^2；T_N 为施氮处理植株氮素累积量，kg/hm^2；T_0 为不施氮处理植株氮素累积量，kg/hm^2。

1.4 数据分析

1）以生长天数为自变量，地上部干物质为因变量，选取 Logistic 方程拟合冬小麦干物质累积的动态变化过程[18]：

$$y = \frac{Y_{max}}{1 + ae^{-ct}} \tag{6}$$

式中 y 为小麦的干物质累积量，kg/hm^2；Y_{max} 为最大干物质累积量，kg/hm^2；t 为播种后天数，d；a 和 c 为待定系数。

对式（6）进行求导得：

$$T_1 = \frac{\ln a - \ln(2 + \sqrt{3})}{c} \tag{7}$$

$$T_2 = \frac{\ln a - \ln(2 - \sqrt{3})}{c} \tag{8}$$

$$V_{max} = \frac{cY_{max}}{4} \tag{9}$$

$$T = T_2 - T_1 \tag{10}$$

$$T_3 = \frac{\ln a - 2.197}{c} \tag{11}$$

$$T_4 = \frac{\ln a + 2.197}{c} \tag{12}$$

$$V_{mean} = \frac{a}{T_4 - T_3} \tag{13}$$

式中 T_1 为干物质快速累积起始时间，d；T_2 为干物质快速累积结束时间，d；T_3 为干物质累积有效增长起始时间，d；T_4 为干物质累积有效增长结束时间，d；V_{max} 为干物质最大累积速率，kg/(hm^2·d)；V_{mean} 为干物质平均累积速率，kg/(hm^2·d)；T 为干物质快速生长期，d。

2）用 Excel 2021 软件对试验数据进行整理和误差计算；用 SPSS20.0 软件中的单因素 AVNOVA 进行方差分析，采用 Duncan's 新复极差法进行显著性方差分析，显著水平 α=0.05；用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 缓释氮肥与尿素配施对冬小麦干物质累积和转运的影响

随生育期推移，地上部干物质累积呈苗期缓慢增加，拔节和灌浆期快速增长，灌浆末期达到最大值后趋于稳定的趋势（图 3），最大干物质累积量随缓释氮肥与尿素配施比例的增加而增加（表 2），用 Logistic 曲线拟合的决定系数均在 0.95 以上，表明此方程可以准确地描述干物质的动态累积过程。

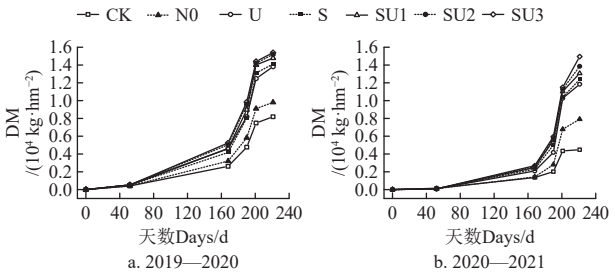

图 3 2019—2021 年冬小麦生育期内干物质动态累积过程

Fig.3 Dynamic accumulation process of dry matter (DM) in winter wheat growth period from 2019 to 2021

表 2　不同处理下冬小麦地上部干物质动态 Logistic 方程拟合参数

Table 2　Fitted parameters of Logistic equations for aboveground dry matter dynamics of winter wheat under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	Y_{max}/(kg·hm^{-2})	R^2	T_1/d	T_2/d	T/d	V_{mean}/(kg·hm^{-2}·d^{-1})	V_{max}/(kg·hm^{-2}·d^{-1})	T_{max}/d
2019—2020	CK	8 188	0.989	161	198	37	133	146	179
	N0	9 808	0.990	161	197	36	162	178	179
	U	13 813	0.992	162	195	33	216	237	179
	S	14 117	0.990	163	198	35	244	269	181
	SU1	14 779	0.991	162	196	34	261	287	179
	SU2	15 192	0.994	160	195	35	258	283	178
	SU3	15 388	0.994	159	195	36	259	285	177
2020—2021	CK	4 484	0.958	177	202	25	78	86	184
	N0	7 911	0.982	178	206	28	170	186	192
	U	11 842	0.984	178	205	27	263	289	192
	S	12 382	0.989	175	206	31	242	266	190
	SU1	13 062	0.990	174	205	31	252	276	189
	SU2	13 856	0.989	174	206	32	258	284	190
	SU3	14 945	0.986	175	208	33	268	295	191

注：Y_{max}，最大干物质累积量；T_1 和 T_2，干物质快速累积起始时间和结束时间；T，干物质快速生长期；V_{mean}，干物质平均累积速率；V_{max}，干物质最大累积速率；T_{max}，达到干物质最大累积速率的时间。

Note: Y_{max}, maximum accumulated dry matter; T_1 and T_2, initial and end time of rapid dry matter accumulation; T, rapid growth period of dry matter; V_{mean}, average dry matter accumulation rate; V_{max}, maximum accumulation rate of dry matter; T_{max}, time to reach the maximum dry matter accumulation rate.

2 a 干物质快速累积起始时间最早的处理为 SU3 和 SU2，较其他各处理提前了 1～4 d（表 2）。随缓释氮肥与尿素配施比例的增加，干物质快速生长期（T）也呈增加趋势。2 a 试验中，与 U 相比，缓释氮肥与尿素配施干物质快速生长期（T）延长了 3～6 d，平均累积速率提高了 1.90%～19.91%。SU3 处理较 SU2、SU1、S、U 和 N0 处理平均累积速率分别提高 2.13%、2.79%、8.45%、10.90% 和 58.76%。与不施氮相比，施氮均提高最大累积速率（V_{max}）。缓释与尿素配施比普通尿素处理，V_{max} 增加了8.43%～11.16%。2019—2020 年和2020—2021 年 V_{max} 分别在 SU1 和 SU3 处理最大为 287 和 295 kg/(hm^2·d)，较 S 和 U 分别提高 6.69% 和 10.90%、21.10% 和 2.08%。缓释氮肥与尿素配施处理达到最大累积速率的时间 T_{max} 比 U 和 S 提前了 1～3 和 1～4 d。由此可见，缓释氮肥与尿素配施有利于促进冬小麦干物质累积，并延长快速生长期。

不同氮肥配施比例显著影响了干物质转运过程（表 3）。配施比例对花前转运量的贡献率、花后生产量和花后转运量对籽粒产量贡献率有极显著影响（P<0.01）；年份对花前转运量及其对籽粒产量贡献率和花后生产量的贡献率有极显著影响（P<0.01）。与不施肥相比，缓释氮肥与尿素配施小麦花前转运量和花后干物质生产量分别提高了 88.12%～101.62% 和 192.65%～233.09%（P<0.05）。

表 3　2019—2021 年不同处理下冬小麦营养器官的花前贮藏干物质转运量与花后干物质生产量

Table 3　Storage dry matter transportation before flowering and photochemical production after flowering in winter wheat under different treatments from 2019 to 2021

年份 Year	处理 Treatment	花前 Before flowering		花后 After flowering	
		转运量 Translocation/(kg·hm^{-2})	贡献率 Contribution/%	生产量 Translocation/(kg·hm^{-2})	贡献率 Contribution/%
2019—2020	CK	1 959±19 d	44.93a	2 401±70e	55.07 d
	N0	1 765±40e	30.23cd	4 074±81c	69.77ab
	U	2 615±70b	39.96b	3 929±120c	60.04c
	S	2 930±85a	43.28a	3 840±99 d	56.72 d
	SU1	2 257±7c	31.95c	4 809±41b	68.05b
	SU2	2 277±1c	31.70c	4 904±27b	68.30b
	SU3	2 040±60 d	28.17 d	5 203±56a	71.83a
2020—2021	CK	1 115±30c	46.82ab	1 227±30 d	53.18ab
	N0	1 952±70bc	55.16a	1 576±66 d	44.84b
	U	2 871±22ab	46.38ab	3 314±75c	53.62ab
	S	2 830±47ab	42.85b	3 750±67bc	57.15a
	SU1	3 200±42a	40.72b	4 724±48abc	59.28a
	SU2	3 034±76a	38.08b	4 936±89ab	61.92a
	SU3	3 089±89a	35.99b	5 515±82a	64.01a
显著性检验 F 值 Significance test F value					
配施比例 Proportion of application（PA）		0.51	31.94**	7.53**	31.94**
年份 Year (YR)		15.77**	52.42**	0.13	52.42**
PA×YR		2.22	5.92**	0.66	5.92**

注：不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著（P<0.05）。*，P<0.05；**，P<0.01。下同。

Note: Different lowercase letter indicates significant differences among treatments in the same year (P<0.05). *, P<0.05; **, P<0.01. Same as below.

小麦产量随花后干物质生产量的增加呈不断增加趋势（图 4，R^2≥0.79）。2019－2020 年和 2020－2021 年小麦花后干物质生产量均在 SU3 处理达到最大值，分别为 5 203 和 5 515 kg/hm^2，2019－2020 年，SU3 的花后干物质生产量较 SU2、SU1、S、U 和 CK处理分别提高了 6.10%、8.19%、35.49%、32.43% 和116.70%（P<0.05），2020－2021 年，SU3 的花后干物质生产量较 S、U 和 CK 处理分别提高了 47.07%、66.42% 和 349.47%（P<0.05），但与 SU2 和 SU1 处理差异不显著。2 a 冬小麦花后干物质生产量对籽粒贡献率（53.18%～71.83%）均高于花前转运量对籽粒的贡献率（28.17%～46.82%），且 2 a 花后干物质生产量对籽粒贡献率均在 SU3 处理达到最大，在

2019－2020 年 SU3 比 U、S、SU1 和 SU2 处理显著提高 19.64%、26.64%、5.56% 和 5.17%（P<0.05），而在 2020－2021 年与 U、S、SU1 和 SU2 间差异不显著（P>0.05）。

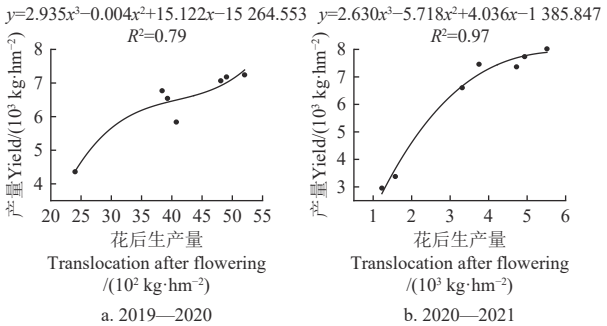

图 4 2019—2021 年冬小麦花后生产量与产量之间的拟合关系

Fig.4 The fitting relationship between translocation after flowering and yield of winter wheat from 2019 to 2021

2.2 缓释氮肥与尿素配施对冬小麦产量及其构成的影响

施氮显著提高了冬小麦产量及构成因素（表 4）。由表 4 可知，缓释氮肥配施比例与年份均对冬小麦穗数、穗长和产量有极显著影响（P<0.01）；二者交互效应对穗粒数和穗长有显著影响（P<0.05），对千粒质量达到极显著水平（P<0.01），对产量影响不显著（P>0.05）。2 a 小麦产量均随缓释氮肥施用比例的增加而增加，SU3 处理产量最高，分别为 7 243 和 8 021 kg/hm^2，平均较 SU1、S 和 U 处理分别提高了 5.71%、7.25% 和 16.07%（P<0.05），但和 SU2 处理产量 7 458 kg/hm^2，差异不显著（P>0.05）。与 2019—2020 年相比，2020—2021 年施肥处理（SU3、SU2、SU1、S 和 U）产量分别提高 10.74%、7.74%、4.23%、10.21% 和 0.95%，CK 和 N0 处理产量降低 32.22% 和 42.15%。缓释氮肥与尿素配施处理与 U 处理相比，提高产量 7.99%～21.44%。

表 4 2019—2021 年不同处理冬小麦产量及其构成因素

Table 4 Grain yield and yield components of winter wheat under different treatments from 2019 to 2021

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Ear number	穗粒数 Grain number per spike	穗长 Ear length/cm	千粒质量 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm^{-2})
2019—2020	CK	338±10 d	34±1c	5.1±0.2 c	26.6±0.7 e	4 360±115 f
	N0	405±11 c	33±1c	5.2±0.3 c	28.9±0.5 d	5 839±85 e
	U	524±13 b	39±2 b	5.8±0.3 b	34.8±0.8 c	6 543±54 d
	S	546±15 b	42±1 ab	6.3±0.2 a	36.4±0.7 b	6 770±79 c
	SU1	563±10 b	44±2 a	6.2±0.1 a	40.9±0.3 a	7 066±48 b
	SU2	631±16 a	43±1 ab	6.5±0.1 a	41.7±0.3 a	7 180±26 ab
	SU3	641±17 a	44±2 a	6.6±0.3 a	41.8±0.2 a	7 243±49 a
2020—2021	CK	217±8 c	29±1 c	9.6±0.3 c	44.2±1.1 a	2 955±88 d
	N0	214±6 c	37±1 b	9.6±0.3 c	39.9±1.2 b	3 378±100 d
	U	301±8 b	57±2 a	10.5±0.3 b	36.4±1.1 c	6 605±80 c
	S	327±10 b	57±1 a	12.0±0.2 a	38.0±0.9 bc	7 461±75 ab
	SU1	314±10 b	57±2 a	11.0±0.3 b	39.1±1.1 bc	7 365±53 b
	SU2	335±11 b	55±2 a	11.1±0.3 b	39.4±1.1 bc	7 736±79 ab
	SU3	384±12 a	51±2 a	11.0±0.2 b	38.7±0.8 bc	8 021±64 a
显著性检验 F 值 Significance test F value						
PA		16.45**	0.92	6.93**	25.16**	4.92**
YR		800.14**	150.24**	1 687.53**	4.19	8.59**
PA×YR		2.75	3.04*	3.46*	6.58**	0.65

对冬小麦进行经济效益分析（表 5）可知，随缓释氮肥配施比例的增加冬小麦肥料投入不断增长，但同时也提高了小麦产值和净收益。与 CK 和 N0 相比，SU1、SU2 和 SU3 处理的净收益分别提高了 409.75%～562.47%、444.04%～605.58%、468.40%～635.93%（P<0.05）。2 a 均在 SU3 净收益最大，比 S 和 U 处理，经济效益提高了 15.18% 和 25.67%。SU2 较 SU3 在减少总支出的同时并没有显著降低经济效益，可实现小麦高效生产与经济收益的“双赢”。

2.3 缓释氮肥与尿素配施对冬小麦氮素累积吸收与利用的影响

施氮对冬小麦地上部氮素累积量有显著影响，缓释氮肥与尿素配施显著提高了冬小麦氮素累积吸收量（P<0.05）（图 5）。2 a 均表现为 SU3 处理氮素累积最大，分别为 196.23 和 189.69 kg/hm^2，但 SU3 与 SU2 处理间差异不显著（P>0.05）。SU3 在 2019—2020 年分别比 U 和 CK 处理提高 24.08% 和 291.53%（P<0.05），2020—2021 年分别提高 36.63% 和 428.31%（P<0.05），但与 SUZ 无显著差异。

2019—2020 年各处理的氮素利用效率相关指标整体较 2020—2021 年低，但各处理变化规律基本一致（图 6）。缓释氮肥与尿素配施较普通尿素处理显著提高了小麦氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率、氮肥吸收利用效率和氮肥偏生产力。2020—2021 年 SU3 较 SU2 处理 S_R 显著提高 14.96%（P<0.05），2019—2020 年 SU3 处理与 SU2 处理 S_R 差异不显著（P>0.05）。2 a 试验中，SU2 处理 S_R 为 45.97%，S_N、S_P 和 S_F 分别为 16.07、30.49 和 42.09 kg/kg，SU3 和 SU2 处理间的 S_N、S_P（2019—2020 年除外）和 S_F 均无显著差异（P>0.05）。SU3 处理的 S_N 较 S 和 U 处理分别提高 82.88% 和 70.96%（P<0.05），但与 SU1 和 SU2 处理差异不显著（P>0.05）。2019—2020 年和 2020—2021 年 S_P 在 SU3 和 SU1 处理达到最大值，分别为 32.47 和 39.72 kg/kg，较 U 分别提高 100.56% 和 17.86%（P<0.05）。2 a 试验中，S_F 均在 SU3 处理达到最大值，分别为 40.24 和 47.80 kg/kg，与 SU1 和 SU2 处理没有显著差异（P>0.05）。

表 5　2019—2021 年不同处理冬小麦的经济效益

Table 5　Economic benefits of winter wheat under different treatments from 2019 to 2021　　元·hm^{-2}

年份 Year	处理 Treatment	产值 Income	投入 Outcome					总投入 Total outcome	净效益 Economic benefit
			种子 Seed	肥料 Fertilizer	种植 Cultivation	收获 Harvest	其他 Other		
2019—2020	CK	6 540 f	750	0	975	750	1 500	3 975	2 565 d
	N0	8 759 e	750	525	975	750	1 500	4 500	4 259 c
	U	9 816 d	750	795	975	750	1 500	4 770	5 046 b
	S	10 156 c	750	1 137	975	750	1 500	5 112	5 044 b
	SU1	10 599 b	750	881	975	750	1 500	4 856	5 744 a
	SU2	10 771 ab	750	966	975	750	1 500	4 941	5 830 a
	SU3	10 865 a	750	1 052	975	750	1 500	5 027	5 838 a
2020—2021	CK	4 610 c	731	0	1 028	750	1 500	4 009	601 c
	N0	5 270 c	731	513	1 028	750	1 500	4 522	748 c
	U	10 305 b	731	783	1 028	750	1 500	4 792	5 513 b
	S	11 640 ab	731	1 107	1 028	750	1 500	5 116	6 524 ab
	SU1	11 491 ab	731	864	1 028	750	1 500	4 873	6 617 ab
	SU2	12 069 a	731	945	1 028	750	1 500	4 954	7 115 a
	SU3	12 513 a	731	1 026	1 028	750	1 500	5 035	7 478 a

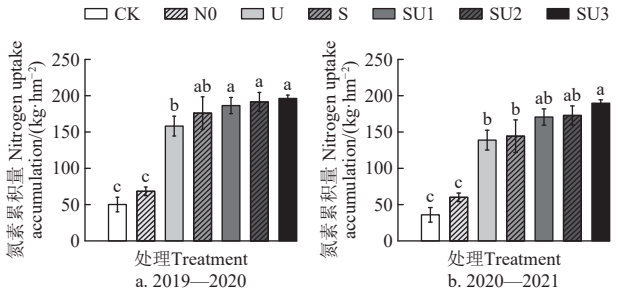

图 5　2019—2021 年不同处理下冬小麦地上部氮素累积量

Fig.5　Nitrogen uptake accumulation of winter wheat under different treatments from 2019 to 2021

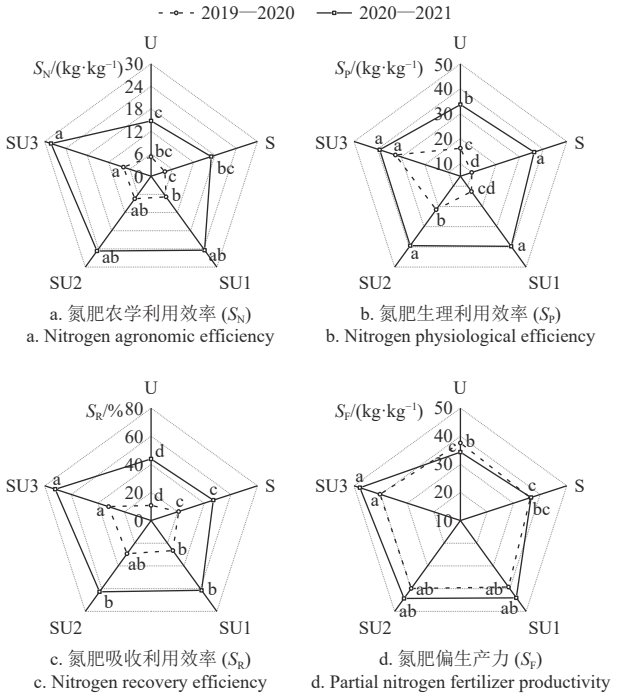

图 6　2019—2021 年不同处理对冬小麦氮素利用效率的影响

Fig.6　Effects of different treatments on nitrogen use efficiency of winter wheat from 2019 to 2021

3　讨　论

3.1　缓释氮肥配施对冬小麦地上部干物质累积和转运的影响

提高作物干物质量是籽粒高产的物质基础[19]。本研究表明，与普通尿素相比，施用缓释氮肥与尿素配施可以显著提高冬小麦成熟期干物质量，这与衣文平等[8,20-21]的研究结果一致。YANG 等[22] 对玉米进行研究发现，施氮提高了干物质累积最高速率，提早了累积速率达到最大值的时间，延长干物质快速生长期的持续时间。本研究对冬小麦进行分析发现，缓释氮肥与尿素配施使干物质快速累积起始时间提前了 1～4 d，并延长干物质快速生长期 3～6 d，同时提高了小麦干物质最大累积速率 8.43%～11.16%（表 2），有利于干物质累积，进而促进产量的提高。该结果进一步被 LYU 等[23] 研究证实，说明将缓释氮肥和尿素配施能更加充分地发挥氮肥对作物生长发育的促进作用，促进作物的干物质累积。

合理施氮能促进花后干物质积累[24]，屈会娟等[25] 研究发现花后干物质累积量对小麦籽粒产量的贡献率达 60% 以上。本研究发现缓释氮肥和尿素配施处理的冬小麦花后生产量随着缓释氮肥配施比例的提高而增加，但花前营养器官中储存物质的转移量和对籽粒的贡献率却明显随之下降。表明缓释氮肥与尿素配施在增加冬小麦花后生产量的同时改善花前转运量。花后是籽粒灌浆的关键时期，较高的干物质累积量能保证小麦正常的灌浆能力[26]。研究发现，小麦花前干物质转运量与产量呈线性负相关，花后干物质累积量与产量呈线性正相关[27]。

施用缓释氮肥与尿素配施有利于开花后干物质累积和干物质对籽粒的贡献，同时也改善了花前转运量以及对籽粒的贡献率。可见，花后干物质累积是冬小麦高产的关键，赵艳等[28-29] 研究得到相同结果。

3.2　缓释氮肥配施对冬小麦产量的影响

土壤养分供应能力直接影响作物生长和产量[30]，合理的氮素运筹是提高作物产量的重要保障[31]。缓释氮肥能够降低氮素损失量，缓慢持续释放养分能够匹配作物需肥特性，实现稳产增产。本研究表明，缓释氮肥与尿素配施可以显著提高穗数、穗粒数、穗长和千粒质量，而有效穗数和穗粒数的增加，可以增加小麦库容量，且产量构成要素之间的叠加效应可以显著提高作物产量[32]。卢艳丽等[33] 研究表明，施用 144 kg/hm^2 缓释氮肥比施用 180 kg/hm^2 常规施肥，显著提高玉米产量 18.30%。ZHENG 等[13] 表明，混施 30% 的缓释氮肥和尿素后，小

麦产量提高 7.9%～10.3%。本研究发现，缓释氮肥与尿素配施处理相较于仅施普通尿素处理提高产量 7.99%～21.44%，年份与配施比例对产量均有显著影响，但二者交互影响不显著（表 4）。2020—2021 年 CK 和 N0 产量比 2019—2020 年降低，可能是因为 2019—2020 年播种前土壤中残留的养分较多，且连续 2 a 不施肥土壤肥力降低。2020—2021 年缓释氮肥与尿素配施产量比 2019—2020 年提高了 4.23%～10.74%，可能连续施肥土壤肥力增加，2020—2021 年小麦生育期内降水量也增加了 35.7 mm，有助于加快硫包衣尿素的供氮速率[34]。

与仅施用缓释氮肥相比，缓释氮肥与尿素配施还可显著降低投入成本，增加冬小麦的产投比。缓释氮肥与尿素 3:1 配施（SU3）处理冬小麦产量最高（$P<0.05$），而缓释氮肥与尿素 1:1 配施（SU2）处理产量与 SU3 差异不显著（$P>0.05$），缓释氮肥与尿素 1:1 配施（SU2）降低投入并获得高产。这与张晨阳等[20] 研究发现施用缓释氮肥和尿素配施在不同品种下的小麦均有显著的增产效果一致。缓释氮肥与尿素配施可以协调养分释放时间和强度，降低普通氮肥养分释放过快导致淋失损失的风险，同时解决了缓释氮肥养分释放速度慢不能满足作物生育前期氮需求的问题和生育后期氮素供应短缺的潜在问题[34-35]。

3.3 缓释氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用的影响

氮素损失的主要原因是氮供应与作物吸收不一致。缓释氮肥能调控土壤中氮肥的释放和转化，对提高氮肥利用率、减少氮素淋失有明显效果[21]。胡迎春等[9] 研究表明，在黄土高原地区，缓释氮肥与普通氮肥配施可显著提高作物氮肥农学利用效率，并达到增产的目的。氮肥利用率的高低与氮素损失之间存在密切联系，本研究发现，与仅施尿素处理相比，缓释氮肥与尿素配施处理显著提高小麦氮素累积吸收量、氮肥吸收利用效率和氮肥偏生产力（图 6），这与张宁宁等[36-38] 的研究结果一致。说明了缓释氮肥配施使得肥料利用率提高，被作物及时并充分吸收同时减少了氮素在土壤中淋失的机会。LYU 等[23] 研究结果表明，缓释氮肥配施比例为 30% 时小麦产量和氮素利用达到最高，但本研究发现缓释氮肥配施比例 50% 时产量与氮素利用效率达到最佳。原因可能是他们的研究采用了秸秆覆盖，而作物秸秆分解和早期小麦生长产生氮竞争，所以生育期前期所需的氮更高，尿素比例相对高一些。施氮对氮素吸收利用效率起主导作用，合理配施氮肥对植株氮素吸收、转运及利用效率有显著影响[31]。缓释氮肥配施的氮素供应优于普通氮肥[39]，研究发现，缓释氮肥与尿素 3∶1 配施（SU3）处理显著提高小麦氮素吸收量、氮素利用效率和花后干物质生产量，并获得较高产量，但缓释氮肥与尿素 1∶1 配施（SU2）处理与 SU3 处理无显著差异。结合经济效益，SU2 较 SU3 在减少总支出的同时并没有显著降低经济效益，缓释氮肥与尿素 1:1 配施（SU2）可实现冬小麦绿色高效生产。

本研究综合分析了不同缓释氮肥与尿素配施比例对冬小麦干物质累积与转运、产量和氮素利用效率的影响，揭示了缓释氮肥与尿素配施对冬小麦地上部干物质累积、花前转运量和花后生产量的影响规律，进一步明晰了缓释氮肥与尿素配施对产量形成的影响机制，并基于产量和氮肥利用效率，确定了冬小麦高产高效的缓释氮肥与尿素配施比例。但后续研究还需考虑环境效应和碳氮排放等，如关于缓释氮肥与尿素配施对土壤硝态氮分布、氨挥发以及温室气体排放的影响还需进一步研究，以确定出冬小麦农田高产高效并同步减排的缓释氮肥与尿素施用量及其配施比例。

4 结 论

为优化施肥结构，开展连续 2 a 缓释氮肥配施比例对冬小麦干物质积累和转运、产量和氮肥利用效率的影响研究，得出如下结论：

1）与普通尿素相比，缓释氮肥与尿素配施可延长冬小麦干物质快速生长期 3～6 d、提高平均累积速率 1.90%～19.91%、增加最大累积速率 8.43%～11.16%，增产 7.99%～21.44%。

2）与仅施尿素和仅施缓释氮肥相比，缓释氮肥与尿素配施冬小麦花后干物质生产量显著增加 32.43%～66.42% 和 35.49%～47.07%，花后干物质生产量对籽粒产量的贡献率均显著提高。缓释氮肥与尿素配施通过协调花前干物质转运量，极大的促进花后干物质累积，从而提高冬小麦的生产力。

3）缓释氮肥与尿素配施比例为 50% 时，冬小麦产量为 7 458 kg/hm^2，氮肥农学利用率、生理利用率和偏生产力分别为 16.07、30.49 和 42.09 kg/kg，吸收利用率为 45.97%，建议作为西北旱区冬小麦绿色高产高效的缓释氮肥与尿素配施比例。

[参 考 文 献]

[1] 宋明丹，李正鹏，冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报，2016，32(2)：119-126.
SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 119-126. (in Chinese with English abstract)

[2] 李越，李根东，陈志君，等. 基于氮收支平衡的河套灌区春小麦农田灌溉和施氮策略[J]. 农业工程学报，2022，38(17)：61-72.
LI Yue, LI Gendong, CHEN Zhijun, et al. Irrigation and N application strategies for spring wheat fields in the Hetao irrigation district based on N balance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 61-72. (in Chinese with English abstract)

[3] 薛高峰，张贵龙，孙焱鑫，等. 包膜控释尿素（追施）对

冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(2)：377-384.
XUE Gaofeng, ZHANG Guilong, SUN Yanxin, et al. Influences of topdressing controlled-release coated urea on plant growth and soil NO^{3-}-N content of winter wheat[J]. Journal of Agro-Environmental Sciences, 2012, 31(2): 377-384. (in Chinese with English abstract)

[4] 解文艳，周怀平，杨振兴，等. 不同缓控释氮肥对连作春玉米产量及氮肥去向的影响[J]. 水土保持学报，2019，33(3)：207-214.
XIE Wenyan, ZHOU Huaiping, YANG Zhenxing, et al. Effects of different slow controlled-release fertilizers on grain yield and nitrogen fate in continuous spring maize production[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 207-214. (in Chinese with English abstract)

[5] GAO X, LI C, 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.

[6] ZHANG S, SHEN T, YANG Y, et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 220: 191-197.

[7] 徐松鹤，赵博洋. 不同缓释肥配施对荞麦产量和品质的影响[J]. 北方农业学报，2020，48(4)：67-70.
XU Songhe, ZHAO Boyang. Effects of different proportion of slow release fertilizer on yield and quality of buckwheat[J]. Journal of Northern Agriculture, 2020, 48(4): 67-70. (in Chinese with English abstract)

[8] 衣文平，孙哲，武良，等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报，2011，22(3)：687-693.
YI Wenping, SUN Zhe, WU Liang, et al. Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil NO^{3-}-N[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 687-693. (in Chinese with English abstract)

[9] 胡迎春，韩云良，施成晓，等. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J]. 西北农业学报，2019，28(7)：1068-1078.
HU Yingchun, HAN Yunliang, SHI Chengxiao, et al. Effects of combined application of slow-release fertilizer and urea on nitrogen utilization and yield efficiency of spring maize on the Loess Plateau[J]. Northwest Journal of Agricultural Sciences, 2019, 28(7): 1068-1078. (in Chinese with English abstract)

[10] GUO J J, FAN J L, XIANG Y, et al. Maize leaf functional responses to blending urea and slow-release nitrogen fertilizer under various drip irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107396.

[11] HU H, NING T, LI Z, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. Field Crops Research, 2013, 142: 85-94.

[12] ZHENG W K, LIU Z G, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.

[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] ZHANG J, LI B, WANG C, et al. Effects of controlled release blend bulk urea on the yield and nitrogen use efficiency of wheat and rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(3): 288-298.

[15] FAN Z, CHEN J, ZHAI S, et al. Optimal blends of controlled-release urea and conventional urea improved nitrogen use efficiency in wheat and maize with reduced nitrogen application[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2): 1103-1111.

[16] 刘刚，万连步，张民，等. 中华人民共和国化工行业标准（HG/T 4215-2011）：控释肥料 [M]. 北京：化学工业出版社，2012.

[17] 马志超，张明学，周仓军，等. 关中西部冬小麦氮磷钾养分丰缺指标及经济最佳施肥量研究[J]. 中国农学通报，2014，30(24)：210-216.
MA Zhicao, ZHANG Mingxue, ZHOU Cangjun, et al. Study on abundant or lack index of nitrogen, phosphorus and potassium and optimum economic fertilizing of winter wheat in western guanzhong district[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(24): 210-216. (in Chinese with English abstract)

[18] RICHARDS F. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of Experimental Botany, 1959, 10: 290-301.

[19] 姬景红，李玉影，刘双全，等. 控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J]. 农业资源与环境学报，2017，34(2)：153-160.
JI Jinghong, LI Yuying, LIU Shuangquan, et al. Effects of controlled-release urea on grain yield of spring maize, nitrogen use efficiency and nitrogen balance[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(2): 153-160. (in Chinese with English abstract)

[20] 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 Chenyang, ZHANG Fucang, GUO Jinjin, et al. Effects of blending ratios of slow-release nitrogen fertilizer and urea on yield and nitrogen uptake of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(4): 669-680. (in Chinese with English abstract)

[21] 邱悦，杨晓燕，李天胜，等. 减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶活性和氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报，2022，36(3)：294-302.
QIU Yue, YANG Xiaoyan, LI Tiansheng, et al. Effects of nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer on soil enzyme activity and nitrogen uptake in cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 294-302. (in Chinese with English abstract)

[22] YANG M, ZHU X Q, BAI Y, et al. Coated controlled-release urea creates a win-win scenario for producing more staple

grains and resolving N loss dilemma worldwide[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125660.

[23] LYU T, SHEN J, MA J, et al. Hybrid rice yield response to potted-seedling machine transplanting and slow-release nitrogen fertilizer application combined with urea topdressing[J]. The Crop Journal, 2021, 9(4): 915-923.

[24] 张英华，张琪，徐学欣，等. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报，2016，32(5)：88-95.
ZHANG Yinghua, ZHANG Qi, XU Xuexin, et al. Suitable micro-sprinkler irrigation frequency and nitrogen fertilizer amount to improve winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 88-95. (in Chinese with English abstract)

[25] 屈会娟，李金才，沈学善，等. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报，2009，35(1)：124-131.
QU Huijuan, LI Jincai, SHEN Xueshan, et al. Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter wheat cultivar Lankao Aizao 8[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 124-131. (in Chinese with English abstract)

[26] YANG C, LI J, ZHANG G, et al. Barley straw combined with urea and controlled-release nitrogen fertilizer improves lint yield and nitrogen utilization of field-seeded cotton[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1208.

[27] SANDERS J L, MURPHY L S, NOBLE A, et al. Improving phosphorus use efficiency with polymer technology[J]. Procedia Engineering, 2012, 46: 178-184.

[28] 赵艳，罗铮，杨丽，等. 氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报，2022，42(8)：1001-1011.
ZHAO Yan, LUO Zheng, YANG Li, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen transport, dry matter accumulation, yield and quality of rice stubble wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(8): 1001-1011. (in Chinese with English abstract)

[29] SHI Y, YU Z W, MAN J G, et al. Tillage practices affect dry matter accumulation and grain yield in winter wheat in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 73-81.

[30] CAI A, XU M, WANG B, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189: 168-175.

[31] 张璐，黄晶，高菊生，等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报，2020，36(5)：106-112.
ZHANG Lu, HUANG Jing, GAO Jusheng, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 106-112. (in Chinese with English abstract)

[32] 卢秉林，包兴国，车宗贤，等. 长期留茬免耕对河西绿洲灌区春小麦产量及稳定性的影响[J]. 农业工程学报，2022，38(7)：117-126.
LU Binglin, BAO Xingguo, CHE Zongxian, et al. Effect of long-term no-tillage with crop stubbles on yield and stability of spring wheat in Hexi Oasis Irrigated Areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(7): 117-126. (in Chinese with English abstract)

[33] 卢艳丽，白由路，王磊，等. 华北小麦玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：209-215.
LU Yanli, BAI Youlu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(1): 209-215. (in Chinese with English abstract)

[34] 李梦月，胡田田，崔晓路，等. 不同释放期控释肥和水氮用量对冬小麦产量的综合影响[J]. 农业工程学报，2020，36(23)：153-161.
LI Mengyue, HU Tiantian, CUI Xiaolu, et al. Comprehensive effects of irrigation water and nitrogen levels for controlled release fertilizer with different release periods on winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 153-161. (in Chinese with English abstract)

[35] RANSOM C J, JOLLEY V D, BLAIR T A, et al. Nitrogen release rates from slow- and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature.[J]. PloS One, 2020, 15(6): e0234544.

[36] 张宁宁，赵德强，韩云良，等. 尿素与缓释肥同一氮素水平下配施对黄土台塬区春玉米生长的影响[J]. 西北农业学报，2020，29(11)：1642-1650.
ZHANG Ningning, ZHAO Deqiang, HAN Yunliang, et al. Effects of combined application of urea and slow-release fertilizer at the same nitrogen level on the growth of spring maize in the Loess Plateau area[J]. Northwest Journal of Agricultural Sciences, 2020, 29(11): 1642-1650. (in Chinese with English abstract)

[37] MANZOOR S, HABIB-UR-RAHMAN M, HAIDER G, et al. Biochar and slow-releasing nitrogen fertilizers improved growth, nitrogen use, yield, and fiber quality of cotton under arid climatic conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 29(9): 13742-13755.

[38] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, et al. Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2022, 122: 157-171.

[39] 曹兵，丁紫娟，侯俊，等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报，2022，38(13)：56-63.
CAO Bing, DING Zijuan, HOU Jun, et al. Effects of controlled-release blended fertilizer combined with densification on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 56-63. (in Chinese with English abstract)

Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat

GU Xiaobo, SONG Hui, BAI Dongping, DU Yadan, CHANG Tian, LU Shiyu, CAI Wenjing

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*;　2. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*)

Abstract: Here, the best ratio of slow-release nitrogen fertilizer to urea was determined to match the nitrogen demand of winter wheat. The fertilizer application structure was also optimized for the efficient use of nitrogen fertilizer and economic benefits. Seven fertilizer treatments were applied into the winter wheat in a two-year field trial: urea only (U), slow-release N fertilizer only (S), slow-release N fertilizer with the urea 1:3 (SU1), 1:1 (SU2), and 3:1 (SU3), no N fertilizer (N0) and no fertilizer (CK). A systematic investigation was made to explore the effects of slow-release N fertilizer application rates on the dry matter accumulation and transport, yield, and N fertilizer use efficiency of winter wheat. The results showed that there was an increase in the rapid growth period and the maximum accumulation rate of dry matter in the winter wheat with the proportion of slow-release N fertilizer. The average dry matter accumulation rate of slow-release nitrogen fertilizer combined with the urea increased by 1.90% to 19.91%, compared with the ordinary urea. The proportion of slow-release nitrogen fertilizer application posed a significant impact on the post post-flowering dry matter production. There was an increase in the pre and post post-flowering dry matter transport. Meanwhile, the post post-flowering dry matter production was contributed 53.18% to 71.83% of the grain yield. The yield increased significantly with the increasing proportion of slow-release N fertilizer, with the two-year yields of 7 243 and 8 021 kg/hm^2 in the SU3, which were 7.25% and 16.07% higher than the S and U treatments, respectively, and their economic benefits were 15.18% and 25.67%, respectively. The cumulative nitrogen uptake of winter wheat increased by the application of slow-release nitrogen fertilizer with the urea. Specifically, the cumulative nitrogen uptake values were 24.08% to 36.63% higher than those in the SU3, compared with the U treatment. The slow-release N fertilizer with the urea was improved the N fertilizer use efficiency. The agronomic use efficiency, physiological use efficiency, and biased productivity were improved in the SU3, compared with the U treatment. But there was no significant difference between SU2 and SU3 treatments (P>0.05). The slow-release N combined with the urea was significantly improved the N use efficiency, but there was no significant difference between SU2 and SU3 treatments (P>0.05). Therefore, the slow-release N fertilizer mixed with the urea can be expected to improve the winter wheat yield and N use efficiency. The dry matter growth period was significantly extended to promote the maximum accumulation rate for the post-flowering dry matter production and its transport rate to the seed. By comprehensive consideration, under the condition of nitrogen application rate of 180 kg/hm^2, the combination of slow-release nitrogen fertilizer and urea application ratio of 50% (SU2) can achieve green, high yield, and high efficiency of winter wheat. Among them, the yield is 7 458 kg/hm^2, the nitrogen fertilizer absorption and utilization rate is 45.97%, and the agronomic utilization rate, physiological utilization rate, and partial productivity are 16.07, 30.49, and 42.09 kg/kg, respectively. The finding can provide the theoretical basis for the rational fertilization of winter wheat. Follow-up studies need to consider the environmental effects and carbon and nitrogen emissions, together with the impact of slow-release nitrogen fertilizer combined with the urea on the soil nitrate nitrate-nitrogen distribution, ammonia volatilization, and greenhouse gas emissions. Further research can be conducted to determine the amount and proportion of slow-release nitrogen fertilizer and urea application for the high yield, high efficiency, and simultaneous emission reduction in winter wheat farmland.

Keywords: nitrogen; urea; fertilizers; wheat; Logistic equation; post-flower dry matter production; nitrogen fertilizer use efficiency; yield