

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

张晨阳, 张富仓*, 郭金金, 刘翔

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室/西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】研究不同氮肥类型下缓释氮肥与尿素掺混对3个不同冬小麦品种生长发育、干物质累积量、产量、氮素转运、吸收利用效率以及土壤硝态氮残留的影响, 探索适宜提高陕西关中地区冬小麦产量的氮肥配比, 为该地冬小麦高效生产的肥料管理提供科学依据。【方法】本试验设置了4个氮肥处理, 分别为纯尿素(U)、纯缓释氮肥(S)、缓释氮肥与尿素8:2掺混(SU₁)、缓释氮肥与尿素6:4掺混(SU₂), 施氮量为180 kg/hm²; 以不施氮肥(N₀)为对照。选取关中地区农民主栽的3个冬小麦品种[小偃22(XY22)、西农979(XN979)和郑麦379(ZM379)]为试材, 每个品种设5个处理。观测冬小麦在主要生育期的株高和叶面积指数, 并分析冬小麦成熟期的干物质累积量、产量、植株氮素累积量和土壤硝态氮残留量。【结果】施氮量相等时, 缓释氮肥与尿素掺施能显著促进冬小麦生长发育, 增加冬小麦的产量和成熟期植株氮素累积量。SU₂处理下不同冬小麦品种的株高、叶面积指数、产量和成熟期植株氮素累积量均达到最大值, 且0—100 cm土层剖面硝态氮残留量最小。SU₂处理下3个冬小麦品种的产量分别比U和S处理提高了31.81%~31.99%和9.66%~25.38%; 营养器官的氮素向籽粒的转移率也分别提高了21.31%~51.12%和2.60%~20.78%。此外, 缓释氮肥与尿素掺施能显著提高3个冬小麦品种的氮素吸收利用效率, 显著促进开花后营养器官的氮素向籽粒转运, XY22、XN979和ZM379在SU处理下, 冬小麦营养器官氮素转运对籽粒的贡献率分别为49.71%、48.32%和49.39%; 在SU₂处理下3个冬小麦品种的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均最大, 分别为17.54和41.95 kg/kg、17.94和41.53 kg/kg、11.32和38.56 kg/kg。冬小麦收获后, XY22在SU₂处理下0—100 cm土层硝态氮的残留总量在3个品种中最小, 为112.67 kg/hm², 比U处理下的硝态氮累积总量明显下降13.48%。这表明缓释氮肥与尿素掺施可以显著提高表层土壤硝态氮含量, 减少硝态氮向土壤深层淋失, 提高氮肥的利用效率。【结论】施氮量为180 kg/hm²时, 缓释氮肥与尿素按6:4掺混是本试验条件下冬小麦高效生产的最佳掺施比例。

关键词: 缓释氮肥与尿素掺施; 冬小麦品种; 产量; 氮素利用效率; 土壤硝态氮

Effects of blending ratios of slow-release nitrogen fertilizer and urea on yield and nitrogen uptake of winter wheat

ZHANG Chen-yang, ZHANG Fu-cang*, GUO Jin-jin, LIU Xiang

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

Abstract: 【Objectives】To explore the optimal blending ratio that is beneficial to increase the yield of winter wheat in Guanzhong Plain, Shaanxi, to provide a scientific basis for fertilizer management in efficient winter wheat production. 【Methods】Field experiments were conducted to study the effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on the growth, yield, nitrogen uptake and utilization and soil nitrate nitrogen residue of three different winter wheat varieties under different nitrogen fertilizer types and blending ratios. There were four

收稿日期: 2019-06-04 接受日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403303); 农业部公益性行业科研专项(201503124); 教育部高等学校创新引智计划(B12007)。

联系方式: 张晨阳 E-mail: zhangchenyang@nwsuaf.edu.cn; *通信作者 张富仓 Tel: 029-87091151, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

nitrogen fertilizer application treatments (U: urea, S: slow release nitrogen fertilizer, SU₁ : a mixture of slow release nitrogen fertilizer and urea with N ratio of 8 : 2 and SU₂ : a mixture of slow release nitrogen fertilizer and urea with N ratio of 6 : 4) in this experiment, and three winter wheat cultivars popularly planted by farmers in Guanzhong Plain, Xiaoyan 22 (XY22), Xinong 979 (XN979) and Zhengmai 379 (ZM379). Plant height, leaf area index, dry mater accumulation, yield, nitrogen uptake and utilization and soil nitrate nitrogen residue of winter wheat were measured. 180 kg/hm² of nitrogen was applied in this research, and no nitrogen plot was designed as the control (CK). **【 Results 】** Slow-release nitrogen fertilizer and urea blending could significantly promote plant growth and increase crop yield, nitrogen uptake and utilization efficiency of winter wheat. The plant height, leaf area index, yield and nitrogen accumulation at maturity stage of different winter wheat cultivars under SU₂ treatment reached the maximum values, the cumulative amount of nitrate nitrogen in the 0–100 cm soil layer under SU₂ treatment reached the minimum value simultaneously. Compared to U and S treatment, the yields were 31.81%–31.99% and 9.66%–25.38% higher; and the N translocation rates were 21.31%–51.12% and 2.60%–20.78% higher under SU₂ treatment, respectively. In addition, slow-release nitrogen fertilizer and urea blending markedly increased nitrogen uptake and use efficiency of three winter wheat cultivars, significantly promoted the transport of nitrogen from the vegetative organs to grains after flowering. Under SU treatment, the contribution rates of nitrogen transport to grain of XY22, XN979 and ZM379 were 49.71%, 48.32% and 49.39%, respectively. The nitrogen agronomic use efficiency and partial factor productivity from applied N of XY22, XN979 and ZM379 under SU₂ treatment reached their largest values, 17.54 kg/kg and 41.95 kg/kg, 17.94 kg/kg and 41.53 kg/kg, 11.32 kg/kg and 38.56 kg/kg, respectively. The cumulative amount of nitrate nitrogen in the 0–100 cm soil layer of XY22 under SU₂ treatment reached the minimum value of 112.67 kg/hm² among the three varieties after harvest, which was 13.48% lower than that under U treatment, with a significant difference. Slow-release nitrogen fertilizer and urea blending distinctly increased the content of nitrate nitrogen in surface soil at maturity stage, reduced nitrate leaching to deep soil, and improved nitrogen use efficiency. **【 Conclusion 】** These results demonstrate that a mixture of slow release nitrogen fertilizer and urea with N ratio of 6 : 4 is the optimal blending ratio when 180 kg/hm² of nitrogen is applied..

Key words: slow-release nitrogen fertilizer blending with urea; winter wheat cultivar; yield; nitrogen use efficiency; soil nitrate

小麦是陕西省的第一大粮食作物，而关中平原是陕西省主要的小麦生产区域，其小麦产量占全省产量的 64%。为给陕西经济的高速发展提供强有力的支撑，提升关中平原小麦的生产能力至关重要^[1]。为保证产量，许多农户增加氮肥投入量。常艳丽等^[2]研究表明，陕西关中地区 38.5% 的农户施氮量很高，远超过平均施氮量，而小麦产量却没有同步增加；同时氮肥前期投入过量也成为制约陕西关中地区农业发展的主要问题。过量的氮肥投入，不仅使肥料的利用率降低，还可能导致作物减产^[3-4]、经济效益降低^[5]，也会造成土壤环境的面源污染等^[6-7]。提高氮肥利用效率一直是众多学者探索的重要问题。氮肥后移技术的提出，显著提高了冬小麦中后期的灌浆速率、产量和氮肥利用率^[8-9]，多次施肥更有利于氮肥利用效率的提高^[10]，但多次施肥也会增加劳动力投入。缓释氮肥的出现，为解决以上问题提供了

新的思路，作为新型的长效肥料，缓释氮肥的养分释放速率与作物养分的吸收速率基本同步^[11-13]，一次性基施就可以基本满足作物各个生育时期的养分需求^[14]，它的出现为提高作物产量和肥料利用效率，有效缓解环境污染提供了新的方法^[15]。但其缓释性可能会造成作物前期养分供应不足，较高的价格也限制了它的推广应用。因此，将缓释氮肥与尿素按一定的比例掺施对于提高陕西关中地区冬小麦产量和肥料利用率具有十分重要的意义。缓释氮肥肥效期较长，基施基本可以满足作物生长时期的养分需求，保证作物的产量，但仅施用缓释肥料很难与作物对肥料的需求规律完全一致，为更好地满足作物生长发育的需求，可将缓释肥料与尿素掺施^[16]。已有的研究表明，相同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混，可显著提高冬小麦和夏玉米干物质累积量和产量，提高氮肥利用效率^[17]；有效提升作物生长后期土壤硝态氮

含量,降低成熟期的残留量,减少肥料的消耗和追肥时劳动力的投入^[18];有效减轻肥料过量投入对水土环境造成的点面源污染^[15]。此外,在缓释氮肥与尿素掺混对作物的影响机制的研究中发现,通过调节作物光合和灌浆等生长生理活动,缓释氮肥与尿素掺施明显促进了作物生长发育中后期干物质累积和转移,促进了籽粒蛋白质和养分含量的增加,在保证小麦产量的同时提高了年平均利润,是一种值得推荐的氮肥运筹方式^[19-21]。目前,陕西关中地区夏玉米的产量及肥料利用效率对缓释氮肥与尿素掺施的响应已有一系列报道,但是关于缓释氮肥与尿素掺施对关中地区不同品种冬小麦生长发育、产量性状和土壤剖面硝态氮累积的影响还需进一步研究。本试验通过设置不同的缓释氮肥与尿素掺施比例,与单施缓释氮肥和尿素作对比,研究不同氮肥类型和掺施比例对关中地区农民主栽的3个冬小麦品种的生长、干物质累积量、产量、氮素转运、氮素吸收利用效率以及土壤硝态氮残留的影响机制,旨在探索适宜提高陕西关中地区冬小麦产量的氮肥配比,为该地冬小麦高效生产的肥料管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2017年10月24日至2018年6月5日在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室节水灌溉试验站进行。该试验站位于108°24'E、34°20'N,属于温带大陆性气候。年平均气温为12.9℃,多年平均降水量和多年平均蒸发量分别为602和1510 mm,全年共有无霜期210天,海拔为521 m。试验期间的气象条件如图1所示。

试验区土壤质地为重壤土,0—100 cm剖面田间持水量为24%,凋萎含水量为8.5%。0—20 cm耕层土壤pH为8.14,有机质为12.0 g/kg,全氮含量为0.89 g/kg、全磷为0.60 g/kg、全钾为14.10 g/kg,碱解氮55.3 mg/kg、有效磷8.21 mg/kg、速效钾132 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设4个氮肥处理:尿素(U)、缓释氮肥(S)、缓释氮肥与尿素以8:2掺混(SU₁)、缓释氮肥与尿素以6:4掺混(SU₂),以不施氮肥(N₀)为对照;以关中地区农民主栽的3个冬小麦品种为研究对象:小偃22(XY22,1990年)、西农979(XN979,2000年)和郑麦379(ZM379,2010年)。每个品种

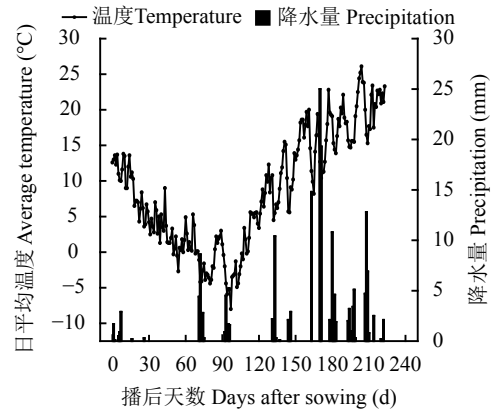


图1 试验期间日平均温度和降水量

Fig. 1 Average temperature and precipitation during the growing season

设5个处理,每个处理重复3次,共45个小区,各小区随机排列。

试验施氮量均为180 kg/hm²,所用氮肥为尿素和缓释氮肥,供试肥料尿素含氮量46.4%,缓释氮肥由山东菲姆频果商贸有限公司生产,含氮量26%,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。缓释氮肥和缓释氮肥与尿素掺混肥均作为基肥于播种前一次性施入,纯尿素施肥按基追比5:5在小麦拔节期(2018年4月5日)追肥。各处理磷肥和钾肥均作为基肥一次性施入。

冬小麦在2017年10月24日播种,播种量为150 kg/hm²,行距为20 cm,2018年6月5日收获。每个试验小区面积为7 m × 3 m = 21 m²,试验区周围设有1 m的相同作物保护行。试验期间于冬小麦拔节期追肥后统一灌水30 mm,其他田间管理措施与当地农户相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生长指标的测定 在冬小麦返青期、拔节期、开花期、灌浆期,每小区随机选取20株长势一致的作物,用卷尺测定株高;在冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期,每小区随机选取3个点,用植物冠层分析仪LAI-2000测定叶面积指数。

1.3.2 植株干物重与产量测定 于冬小麦成熟期每小区随机破坏性取样20株。在105℃下杀青30 min,然后在75℃烘至恒重,称干物重;产量及其构成要素测定于冬小麦成熟期各小区随机选取1 m²取样,风干至籽粒水分含量为14%时测定产量。

1.3.3 植株氮素吸收量测定 冬小麦开花期和成熟期取样,开花期分为茎、叶和穗3部分,成熟期分

为茎、叶、穗和籽粒 4 部分。样品在 105℃ 下杀青 30 min, 然后在 75℃ 烘至恒重, 将烘干后的植株地上部各组织器官用小型粉碎机粉碎, 过 1 mm 筛, 经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后通过连续流动分析仪 (Auto Analyzer-III, 德国 Bran Luebbe 公司) 测定植株各组织器官全氮含量^[22]。

1.3.4 土壤硝态氮含量的测定 在冬小麦收获后, 采用土钻法取 0—100 cm 土层土样, 每 20 cm 为一个取样区间。将土样自然风干研磨后过 2 mm 筛, 称取 5 g 土, 采用 2 mol/L KCl 溶液浸提, 振荡 30 min 后过滤, 采用流动分析仪 (AutoAnalyzer-III, 德国 Bran +Luebbe 公司) 测定土壤中硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量^[18, 23]。硝态氮累积量计算公式^[24]如下:

$$M = \frac{C \times H \times Y}{10}$$

式中, M 为土壤硝态氮的积累量 (kg/hm²); C 为土壤硝态氮含量 (mg/kg); H 为土层深度 (cm); Y 为土壤容重 (g/cm³)。

1.3.5 植株氮素吸收、转运及氮肥利用效率的计算

相关计算公式^[22, 24-27]如下:

植株氮素吸收量 (kg/hm²) = 植株氮素含量 × 干物质质量

开花期后氮素吸收量 (kg/hm²) = 成熟期氮素吸收总量 - 开花期营养器官氮素吸收量

营养器官氮素转移量 (kg/hm²) = 开花期营养器官氮素吸收量 - 成熟期营养器官氮素吸收量

营养器官氮素转移率 (%) = 营养器官氮素转移量 / 开花期营养器官氮素吸收量 × 100

营养器官氮素贡献率 (%) = 营养器官氮素转移量 / 成熟期籽粒氮素吸收量 × 100

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区植株吸氮量 - 不施氮区植株吸氮量) / 施氮量 × 100

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 籽粒产量 / 施氮量

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

土壤氮依存率 (%) = 不施氮区植株吸氮量 / 施氮区植株吸氮量 × 100

采用 Excel 2013 进行数据整理和误差计算; 采用 SPSS 23.0 软件中的单因素 ANOVA 进行方差分析, 采用 Duncan 新复极差法进行显著性方差分析; Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦生长的影响

2.1.1 冬小麦株高 适宜的株高不仅可以保障小麦的营养供给, 还有利于增强抗倒性能, 进而实现较高的产量^[28]。图 2 显示, 随着生育期的推进, 冬小麦的株高逐渐增大; 与不施氮肥相比, 不同氮肥类型及其掺施比例处理都能明显地促进冬小麦株高的增加。返青期到拔节期冬小麦株高的增长速度最快, SU₂ 处理下冬小麦株高增长量分别比 N₀、U、S 和 SU₁ 高出 39.7%、21.6%、10.0% 和 2.8%; 开花期到灌浆期冬小麦株高的增长速度缓慢, U 处理下 XY22 灌浆期的株高仅比开花期提高 1.3 cm。开花期 U 处理下冬小麦株高低于 S 和 SU 处理, 说明缓释氮肥能够释放充足的氮素供给冬小麦生长。等氮量条件下, 3 种不同年代冬小麦品种各生育期株高均表现为 SU₂ > SU₁ > S > U。

2.1.2 冬小麦叶面积指数 叶片是植物的主要营养器官, 它通过影响作物的光合作用进而影响作物的

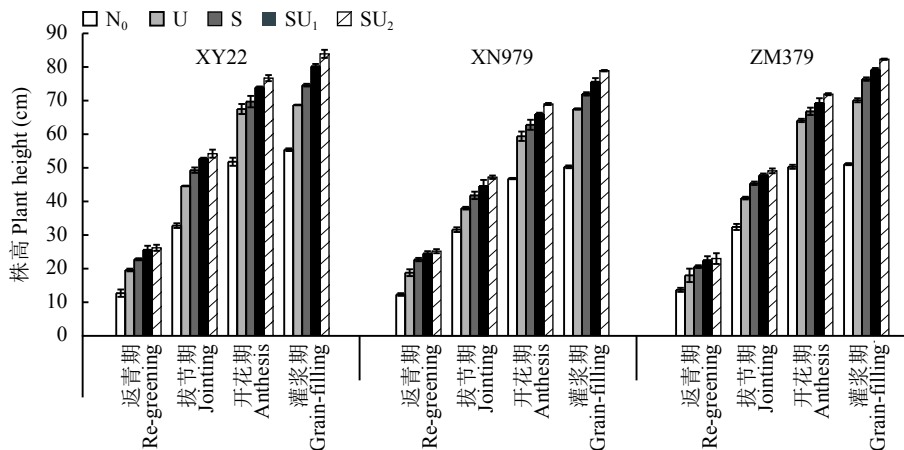


图 2 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦株高的影响

Fig. 2 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on plant height of winter wheat

生长发育和生物量的累积。由图3可知, 3个冬小麦品种的叶面积指数均从返青期到拔节期快速增长, 在开花期达到最大, 且均呈现 $SU_2 > SU_1 > S > U$ 的趋势。由此可见, 冬小麦的叶面积指数以 SU_2 处理最高。

2.2 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦干物质累积的影响

由图4可以看出, 施氮可以使成熟期冬小麦地上部干物质累积量显著增加, 且不同氮肥类型和掺施比例处理对冬小麦地上部干物质累积量有显著影响。等氮量条件下, 3个冬小麦品种成熟期地上部干物质累积量均表现为 $SU_2 > SU_1 > S > U$ 处理, 且不同施肥处理间差异显著。与U处理相比, S、 SU_1 和 SU_2 处理下 XY22、XN979 和 ZM379 的成熟期地上

部干物质累积量分别高出 10.56%~25.73%、14.88%~39.14% 和 18.13%~50.19%。冬小麦成熟期的干物质累积量主要集中在籽粒中, SU_2 处理下 XY22、XN979 和 ZM379 的籽粒干物质累积量分别比 U 处理高 31.41%、34.88% 和 31.00%。由此可见, SU_2 处理下 3 种冬小麦的干物质累积量最高, 有利于增产。

2.3 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦穗长、千粒重和产量的影响

表1显示, 氮肥类型和掺施比例处理对3种不同年代冬小麦的穗长、千粒重和产量有显著的影响。相比 N_0 处理, 施氮可以使3种冬小麦的产量显著提高 7.42%~76.08%。等氮量条件下, 3个冬小麦品种的千粒重和产量均表现为 $SU_2 > SU_1 > S > U$, 各

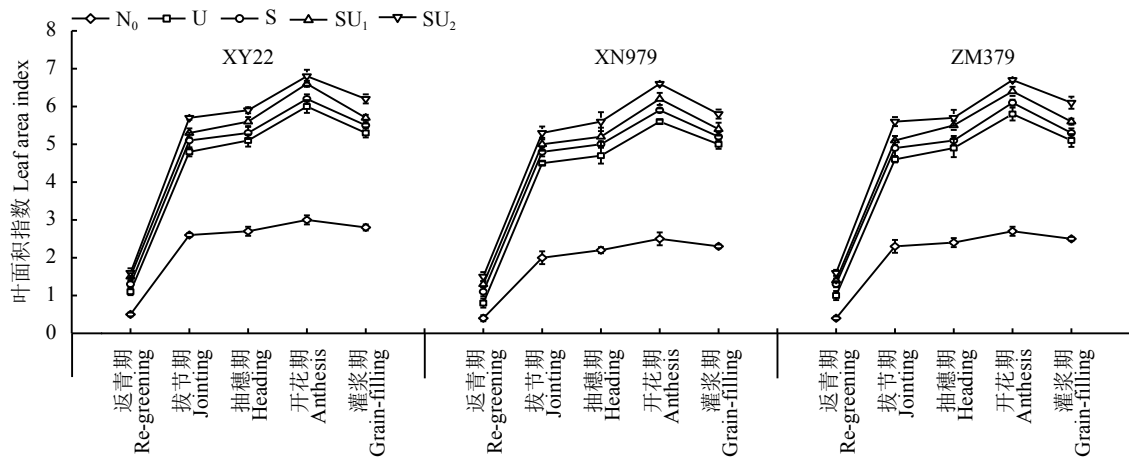


图3 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦叶面积指数的影响

Fig. 3 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on leaf area index of winter wheat

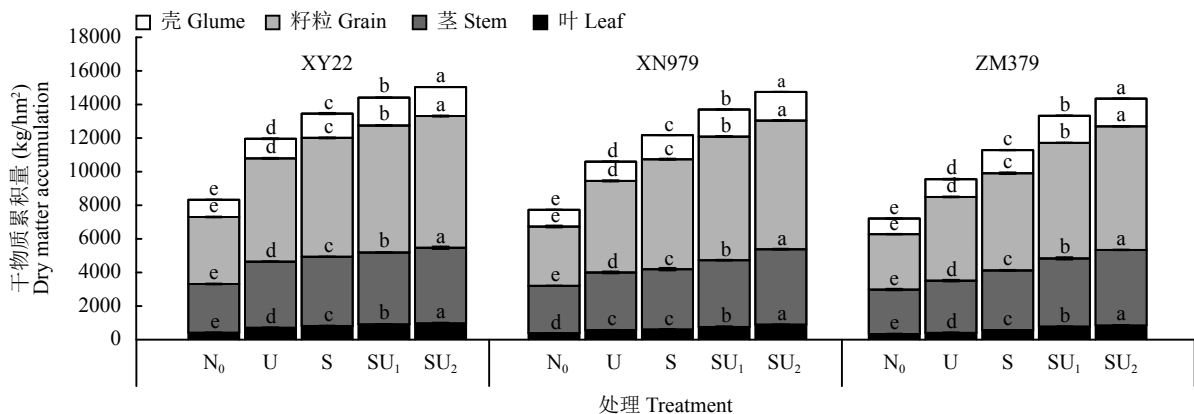


图4 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦成熟期地上部干物质质量的影响

Fig. 4 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on dry matter accumulation amount at maturity stage of winter wheat

[注 (Note): 柱上不同字母表示相同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters in the bars indicate significant difference among treatments for the same cultivar ($P < 0.05$).]

表 1 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦穗长、千粒重和产量的影响
 Table 1 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on ear length, 1000-grain weight and yield of winter wheat

品种 Cultivar	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	穗长 (cm) Ear length	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/hm ²) Yield
XY22	N ₀	6.50 d	27.77 e	4393 e
	U	7.57 c	34.46 d	5725 d
	S	7.73 bc	36.07 c	6766 c
	SU ₁	7.87 b	41.43 b	7072 b
	SU ₂	8.60 a	49.23 a	7551 a
XN979	N ₀	6.90 c	26.60 e	4246 e
	U	7.90 b	33.86 d	5664 d
	S	8.00 ab	39.60 c	6817 c
	SU ₁	8.00 ab	43.22 b	7196 b
	SU ₂	8.33 a	46.10 a	7476 a
ZM379	N ₀	6.23 d	25.97 d	4902 e
	U	7.27 c	30.76 c	5265 d
	S	7.43 bc	34.38 bc	5535 c
	SU ₁	7.57 b	37.91 ab	6190 b
	SU ₂	8.07 a	41.12 a	6940 a
显著性分析 Significance analysis				
氮肥 Nitrogen fertilizer		**	**	**
品种 Cultivar		**	**	**
氮肥 × 品种 Nitrogen fertilizer × Cultivar		**	**	**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示相同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed with different letters in the same column indicate significant difference among different treatments for the same cultivar ($P < 0.05$). **— $P < 0.01$.

施肥处理之间产量均有显著性差异; 除 XN979 外, SU₂ 处理下冬小麦的穗长均显著高于其他施肥处理。SU₂ 处理下冬小麦产量分别比 SU₁、S 和 U 处理高出 3.89%~12.11%、9.66%~25.38% 和 31.81%~31.99%; 千粒重分别高出 6.25%~15.83%、14.10%~26.73% 和 36.15%~42.86%; 穗长分别高出 0.81%~8.90%、2.46%~10.78% 和 11.00%~13.61%。由此可见, SU₂ 处理效果好于其他处理。

2.4 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦开花期后氮素累积和转运的影响

从表 2 可以看出, 氮肥类型和掺施比例处理显著影响冬小麦营养器官氮吸收和开花后营养器官氮素转运。SU₂ 处理下开花期后营养器官氮素吸收和转移量显著高于其他施肥处理, 且各施肥处理间有显著差异。开花期后, 缓释氮肥与尿素掺施处理下冬小麦营养器官的氮素转移率以及对籽粒的贡献率高

于其他氮肥处理。SU₂ 处理下冬小麦营养器官的氮素转移率分别比 U 和 S 处理高 21.31%~51.12% 和 2.60%~20.78%; 氮素转移对籽粒的贡献率分别比 U 和 S 处理高 21.21%~58.81% 和 2.79%~23.60%。由此可见, 与单施缓释氮肥和尿素相比, 缓释氮肥与尿素掺施可以明显增加成熟期氮素在籽粒中的分配量, 其中以 SU₂ 处理的效果最好。

2.5 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦氮素吸收利用的影响

从表 3 可以看出, 施用氮肥后冬小麦成熟期吸氮量显著增加。氮肥类型和掺施比例处理显著影响冬小麦氮素吸收利用。等氮量条件下, 冬小麦的成熟期氮素吸收量、氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均表现为 SU₂ > SU₁ > S > U, 土壤氮依存率表现为 U > S > SU₁ > SU₂, 各施肥处理间均有显著差异。SU 处理下, 3 种冬小麦营养器官氮素

表 2 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦开花期后营养器官氮素向籽粒转运的影响

Table 2 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on anthesis N accumulation and remobilization of winter wheat

品种 Cultivar	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	营养器官氮吸收 (kg/hm ²) Vegetative N uptake		开花期后氮素吸收 Post-anthesis N uptake (kg/hm ²)	转移量 Translocation amount (kg/hm ²)	转移率 Translocation rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
		开花期 Anthesis	成熟期 Maturity				
XY22	N ₀	42.60 e	28.04 e	36.63 e	14.56 e	34.14 c	28.40 c
	U	95.27 d	55.26 d	57.41 d	40.01 d	41.99 b	41.06 b
	S	116.34 c	58.58 c	61.54 c	57.77 c	49.65 a	48.42 a
	SU ₁	128.53 b	62.48 b	66.98 b	66.05 b	51.39 a	49.65 a
	SU ₂	133.53 a	65.50 a	68.65 a	68.02 a	50.94 a	49.77 a
XN979	N ₀	32.57 e	26.47 e	32.49 e	6.10 e	18.73 c	15.81 d
	U	74.84 d	52.40 d	52.52 d	22.44 d	29.99 c	29.94 c
	S	94.64 c	56.20 c	57.77 c	38.43 c	40.61 b	39.95 b
	SU ₁	116.45 b	59.03 b	61.22 b	57.42 b	49.31 a	48.39 a
	SU ₂	123.93 a	63.47 a	64.86 a	60.46 a	48.78 a	48.24 a
ZM379	N ₀	28.50 e	22.78 d	28.33 d	5.71 e	19.94 c	16.65 d
	U	65.95 d	48.33 c	48.12 c	17.62 d	26.75 c	26.68 c
	S	90.66 c	53.70 b	53.66 b	36.96 c	40.76 b	40.23 b
	SU ₁	110.91 b	57.53 ab	55.16 b	53.05 b	47.83 ab	49.02 a
	SU ₂	118.77 a	60.29 a	59.04 a	58.48 a	49.23 a	49.76 a
显著性分析 Significance analysis							
氮肥 Nitrogen fertilizer		**	**	**	**	**	**
品种 Cultivar		**	**	**	**	**	**
氮肥 × 品种 Nitrogen fertilizer × Cultivar		**	NS	**	**	*	**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示相同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed with different letters in the same column indicate significant difference among different treatments for the same cultivar ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$, **— $P < 0.01$, NS—差异不显著 No significant difference ($P > 0.05$).

转运对籽粒的贡献率分别为 49.71%、48.32% 和 49.39%。相比 U 处理, S、SU₁、SU₂ 可以使 3 种不同年代冬小麦的土壤氮依存率显著降低 14.16%~35.84%, 氮肥偏生产力提高, SU₁、S 和 U 处理下 XY22 的氮肥偏生产力分别比 SU₂ 处理减少了 6.34%、10.40% 和 24.18%。由此可见, 与单施缓释氮肥和尿素相比, 缓释氮肥与尿素掺施可以显著促进氮素吸收, 提高氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力, 降低土壤氮依存率, 其中以 SU₂ 处理的效果最好。

2.6 缓释氮肥与尿素掺施对土壤硝态氮分布和累积的影响

2.6.1 成熟期土壤硝态氮分布

如图 5 所示, 相比

N₀ 处理, 施用氮肥后, 3 种不同年代冬小麦成熟期 0—100 cm 土层中硝态氮的含量显著增加。缓释氮肥处理下土壤中硝态氮主要集中在 0—40 cm 土层, 整体表现为 SU₂ > SU₁ > S > U。XY22、XN979 和 ZM379 施用不同类型氮肥时, SU₂ 处理下 0—40 cm 土层中硝态氮含量较 SU₁、S 和 U 分别增加了 1.47%~3.80%、5.14%~8.41% 和 6.10%~16.97%。同时, SU₂ 处理下 60—100 cm 土层中硝态氮含量显著低于其他施氮处理, XY22、XN979 和 ZM379 在 SU₂ 处理下 60—100 cm 土层中硝态氮含量较 U 分别减少了 27.73%、34.36% 和 22.74%。U 处理下, XY22 和 XN979 两种冬小麦成熟期 0—80 cm 土层中硝态氮含量减少, 80—100 cm 缓慢增加。以上结果

表 3 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦氮素吸收利用的影响

Table 3 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on nitrogen uptake and use efficiency of winter wheat

品种 Cultivar	氮肥处理 Nitrogen fertilizer treatment	成熟期氮累积量 N accumulation at maturity (kg/hm ²)	氮肥表观利用率 Apparent N use efficiency (%)	氮肥农学利用率 N agronomic use efficiency (kg/kg)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity from applied N (kg/kg)	土壤氮依存率 Soil N dependent rate (%)
XY22	N ₀	79.23 e				
	U	152.68 d	40.81 d	7.40 d	31.80 d	51.89 a
	S	177.88 c	54.81 c	13.18 c	37.59 c	44.54 b
	SU ₁	195.52 b	64.60 b	14.88 b	39.29 b	40.52 c
	SU ₂	202.18 a	68.30 a	17.54 a	41.95 a	39.19 d
XN979	N ₀	65.06 e				
	U	127.36 d	34.61 d	7.88 d	31.46 d	51.08 a
	S	152.41 c	48.53 c	14.29 c	37.87 c	42.69 b
	SU ₁	177.68 b	62.57 b	16.39 b	39.98 b	36.62 c
	SU ₂	188.79 a	68.74 a	17.94 a	41.53 a	34.46 d
ZM379	N ₀	56.83 e				
	U	114.08 d	31.81 d	2.02 d	29.25 d	49.81 a
	S	145.32 c	49.16 c	3.52 c	30.75 c	39.11 b
	SU ₁	166.07 b	60.69 b	7.16 b	34.39 b	34.22 c
	SU ₂	177.81 a	67.21 a	11.32 a	38.56 a	31.96 d

显著性分析 Significance analysis

品种 Cultivar	**	**	**	**	**
氮肥 Nitrogen fertilizer	**	**	**	**	**
品种 × 氮肥 Cultivar × Nitrogen fertilizer	**	**	**	**	**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示相同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed with different letters in the same column indicate significant difference among different treatments for the same cultivar ($P < 0.05$). **— $P < 0.01$.

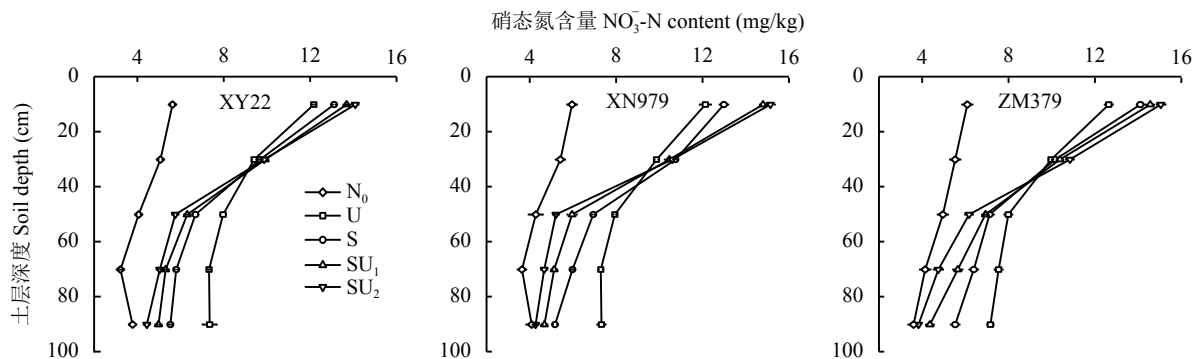


图 5 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦成熟期 0—100 cm 土层硝态氮分布的影响

Fig. 5 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on NO₃⁻-N distribution in the 0–100 cm soil depth at maturity stage of winter wheat

显示, 缓释氮肥与尿素掺施可以增加表层土壤硝态氮含量, 减少土壤氮素向深层土壤淋失, 其中以

SU₂ 处理的效果最好。

2.6.2 土壤硝态氮累积量 从图 6 可以看出, 施用

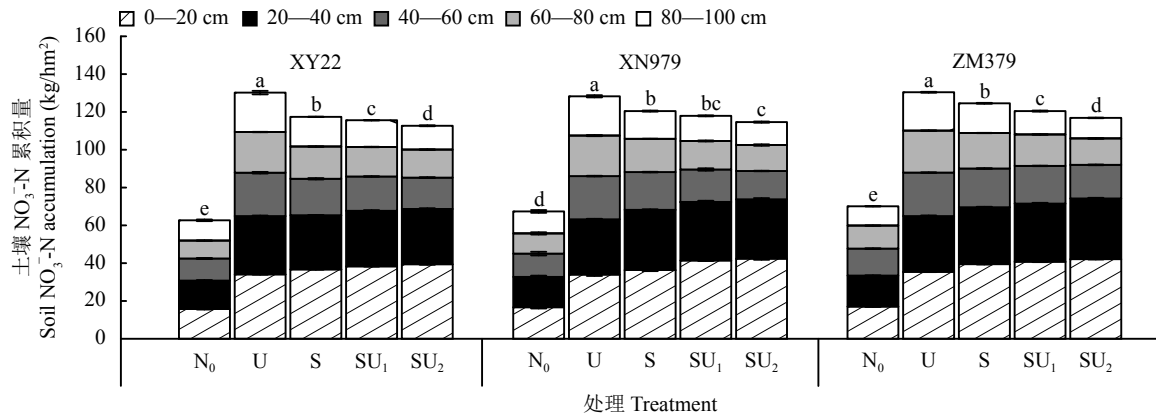


图 6 缓释氮肥与尿素掺施对冬小麦成熟期土壤 0—100 cm NO₃⁻-N 累积量的影响

Fig. 6 Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on soil NO₃⁻-N accumulation amount in the 0–100 cm soil depth at maturity stage of winter wheat

[注 (Note): 柱上不同字母表示相同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same cultivar ($P < 0.05$.)

氮肥后土层中硝态氮的累积量显著增大, 3 个品种的冬小麦成熟期 0—40 cm 土层中硝态氮的分布整体呈现 $SU_2 > SU_1 > S > U$ 。SU₂ 处理下 XY22、XN979 和 ZM379 的 0—40 cm 土层中硝态氮累积量分别占 0—100 cm 土层中总硝态氮累积量的 60.94%、64.35% 和 63.53%; 分别比 U 处理高出了 5.81%、16.73% 和 14.35%。而 0—100 cm 土层中硝态氮的累积量却整体呈现 $U > S > SU_1 > SU_2$, 且不同氮肥类型之间均有显著差异。XY22 在 SU₂ 处理下 0—100 cm 土层硝态氮的残留总量为 3 个冬小麦品种中最小, 为 112.67 kg/hm², 比 U 处理下的硝态氮累积总量明显降低 13.48%。以上结果表明, 缓释氮肥与尿素掺施可以显著增加表层土壤中硝态氮累积量, 有效地降低硝态氮沿土层下移的损失, 在提高氮肥利用率的同时, 为作物生长提供更充足的养分, 其中以 SU₂ 的效果最好。

3 讨论

已有研究表明, 缓释氮肥能显著促进植物的生长发育, 缓释氮肥处理下植物的株高、茎粗、叶面积指数均显著提高^[29-30]。本试验表明, 相比单施尿素和缓释氮肥, 缓释氮肥与尿素掺混一次性基施可以明显提高冬小麦的株高和叶面积指数。施氮量相同时, 不同生育时期冬小麦的株高和叶面积指数均呈现 SU_2 处理 $>$ SU_1 处理 $>$ S 处理 $>$ U 处理, 不同氮肥类型和掺施比例处理下均有明显差异。这与郭金金^[29]的研究结果一致, 缓释氮肥与尿素掺施可以显著提高冬小麦的株高和叶面积指数。

缓释肥高效、环保等效果日益得到证明^[31-32]。本试验结果表明, 相比单施尿素和缓释氮肥, 缓释氮肥与尿素掺混一次性基施可以显著提高冬小麦的地上部干物质累积量和产量。施氮量相同时 3 种不同年代冬小麦地上部干物质累积量和产量整体呈现 SU_2 处理 $>$ SU_1 处理 $>$ S 处理 $>$ U 处理, 不同氮肥类型处理下均有显著差异。SU₂ 处理下, 3 种冬小麦的成熟期干物质累积量、穗长和千粒重均明显高于其他施肥处理, 从而保证了较高的产量。这与衣文平等^[33]和栗丽等^[34]的研究结果一致。而李伟等^[35]的研究发现控释尿素与普通尿素按 5 : 5 配施的效果最好; 何杰等^[36]认为尿素掺施 20%~40% 控释氮肥是适宜冬小麦生产的配比, 控释氮肥掺混比例高达 40% 时, 前期供氮量的不足会造成冬小麦后期晚熟现象, 从而导致减产。造成研究结果差异的原因可能有 3 种: 一是试验地土壤基础条件不同, 气候条件不同, 试验所采用的肥料也不同; 二是试验施氮量不同, 本试验施氮量为 180 kg/hm², 而李伟等^[35]的试验施氮量为 225 kg/hm², 何杰等^[36]的试验施氮量为 150 kg/hm²; 三是试验所设置的掺施比例不同, 本研究只设置了两种掺施比例, 且都是缓释氮肥比例较高。

前人^[37-38]研究表明, 施用缓释肥可以促进作物吸收氮肥, 显著提高氮收获指数和氮素利用率。本试验研究表明, 3 种不同年代冬小麦开花期后的氮素吸收和转运整体呈现 SU_2 处理 $>$ SU_1 处理 $>$ S 处理 $>$ U 处理, 与成熟期干物质累积量的趋势一致。SU₂ 处理不仅可以提升籽粒干物质累积量, 还可以通过促进 3 种不同年代小麦开花后氮素向籽粒的转运量和

转移率, 进而提升产量。这与张敬昇等^[39]的研究结果相吻合, 小麦干物质累积规律与氮素累积规律基本一致。缓释肥料养分释放率与作物养分的吸收相同步, 可实现供肥强度与作物生理需求的动态平衡, 以提高肥效, 是一种肥效期较长、养分不易损失的新型化学肥料^[12-13]。本试验缓释氮肥与尿素掺混下的冬小麦开花期后氮素转运及利用有明显的优势, SU_2 和 SU_1 处理下的氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力显著高于 S 和 U 处理, 表明相比于单施缓释氮肥或尿素, 缓释氮肥与尿素掺混能弥补尿素养分释放过快、需要后期追施的缺点, 也能解决缓释氮肥前期释放速率慢的问题, 具有省时省工的优势。这与常凤等^[40]的研究结果一致, 控释氮肥与尿素掺混可以解决前期供氮过量及后期供氮不足这一潜在问题。

施氮是增产的重要措施, 作物前期吸氮能力较弱, 前期大量施入尿素会造成浪费, 过多的氮会给土壤和水环境带来负面影响, 也会降低氮肥利用效率、增大肥料投入^[41-42]。本试验发现, 在等氮量条件下, 3 种不同年代冬小麦均表现为缓释氮肥与尿素掺混可以显著提高表层土壤 (0—40 cm) 的硝态氮累积量供下季作物生长, 减少养分向深层土壤的淋失; 同时, 0—100 cm 土层的硝态氮累积总量又明显小于尿素处理, 减少了不必要的氮肥损失, 一定程度上提高了氮肥利用率, 这与王寅等^[43]的研究结果一致。3 个品种小麦 SU_2 处理下土壤硝态氮累积量显著低于 S 和 SU_1 处理, 但是单施尿素处理下小麦 3 个品种间土壤硝态氮累积量没有显著差异。

4 结论

缓释氮肥与尿素掺混能显著促进冬小麦的生长发育和提高氮素利用效率, 其中缓释氮肥与尿素按 6 : 4 掺混 (SU_2) 一次性基施冬小麦的地上部干物质累积量和产量最高, 开花期后营养器官氮素向籽粒的转运量最大, 氮素利用效率最高。不同冬小麦品种的氮素吸收利用效率虽然不同, 但肥料效果均以 SU_2 施肥模式最好。

尿素与缓释氮肥掺混可以显著提高表层土壤硝态氮含量, 减少硝态氮向土壤深层淋失。虽然不同冬小麦品种由于吸收利用氮素的能力不同, 导致成熟期土壤硝态氮残留量有差异, 但是均以缓释氮肥与尿素按 6 : 4 掺混 (SU_2) 一次性基施的最低。因此, 在施氮量为 180 kg/hm^2 的情况下, 缓释氮肥与

尿素按 6 : 4 掺混是本试验条件下冬小麦高效生产的最佳掺混比例。

参 考 文 献:

- [1] 张保军, 张正茂, 李思训, 等. 提升陕西省小麦生产能力的区域分析[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 701–705.
Zhang B J, Zhang Z M, Li S X, *et al.* Regional analysis to promote the wheat productivity in Shaanxi Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(4): 701–705.
- [2] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51–61.
Chang Y L, Liu J M, Li Y H, *et al.* Investigation and evaluation of fertilization under winter and maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(8): 51–61.
- [3] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 等. 不同施氮水平和基追比对弱筋小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 75–80.
Lu Z G, Dai T B, Jiang D, *et al.* Effects of different nitrogen rates and dressing ratios on grain yield and quality in weak-gluten wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 75–80.
- [4] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015–3024.
Wang X Y, Yu Z W. Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3015–3024.
- [5] 傅丽青, 薛占奎, 房玉伟, 等. 不同缓/控释肥对单、双季晚稻生产特性及经济效益的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(6): 577–582.
Fu L Q, Xue Z K, Fang Y W, *et al.* Effect of time-release fertilizers on production and economic efficiency of single- and double-planting, late-season rice farming[J]. Fujian Journal of Agricultural Science, 2017, 32(6): 577–582.
- [6] Bockman O C, Kaarstad O, Lie O H, Richards I. Agriculture and fertilizers: Fertilizers in perspective[M]. Norway, Norsk Hydro, 1990.
- [7] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2–3): 117–127.
- [8] 吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 氮肥后移对花后受渍冬小麦灌浆特性及产量构成的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(3): 570–576.
Wu J D, Li J C, Wei F Z, *et al.* Effects of postponing nitrogen application on grain filling characteristics and yield components of winter wheat suffered waterlogging after anthesis[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(3): 570–576.
- [9] 李彬. 冬小麦氮肥后移高效施肥技术[J]. 中国农业信息, 2014, (21): 11.
Li B. The technology of applying nitrogen fertilizer in winter wheat[J]. China Agricultural Information, 2014, (21): 11.
- [10] 周琦. 氮肥运筹对冬小麦生长和养分吸收的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2017.
Zhou Q. Effects of nitrogen fertilizer management on growth and nutrient uptake of winter wheat[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2017.

- [11] 李清伟. 分析高效缓释肥替代普通化肥的优势[J]. *农民致富之友*, 2015, (2): 287.
Li Q W. Analysis of the advantages of high efficiency slow release fertilizer instead of common fertilizer[J]. *Nongmin Zhifu Zhiyou*, 2015, (2): 287.
- [12] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 463–473.
Fan X L, Liu F, Liao Z Y, *et al.* The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 463–473.
- [13] 韩晓日. 新型缓/控释肥料研究现状与展望[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(1): 3–8.
Han X R. Current situation and prospects of new type slow and controlled releasing fertilizers[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(1): 3–8.
- [14] 张少红. 高效缓释肥替代普通化肥的优势研究[J]. *农业与技术*, 2016, 36(18): 22.
Zhang S H. Study on the advantages of high efficiency slow release fertilizer substituting common fertilizer[J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(18): 22.
- [15] Zebarth B J, Rosen C J. Research perspective on nitrogen BMP development for potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2007, 84(1): 3–18.
- [16] 汪强, 李双凌, 韩燕来, 等. 缓释肥对冬小麦增产与提高氮肥利用率的研究[J]. *磷肥与复肥*, 2006, (6): 74–75.
Wang Q, Li S L, Han Y L, *et al.* Effect of slow release fertilizers on winter wheat under sandy soil[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2006, (6): 74–75.
- [17] 郭金金, 张富仓, 同世程, 等. 缓释氮肥与尿素掺混对玉米生理特性和氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1194–1204.
Guo J J, Zhang F C, Yan S C, *et al.* Effects of blending of slow-release nitrogen fertilizer and urea on maize physiological characteristics and nitrogen uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1194–1204.
- [18] 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.
- [19] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 627–633.
Yang W Y, He M R, Wang Y J, *et al.* Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(5): 627–633.
- [20] 党建友, 裴雪霞, 屈会选, 等. 复合包裹控释肥对小麦生长发育及土壤养分的影响[J]. *小麦研究*, 2009, 30(1): 1–10.
Dang J Y, Pei X X, Qu H X, *et al.* Effect of weathered coal-based coated fertilizer on winter wheat growth and soil available nutrient[J]. *Journal of Wheat Research*, 2009, 30(1): 1–10.
- [21] 陈国清, 肖尧, 景立权, 等. 不同缓释肥水平对超高产夏玉米产量及群体质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(30): 182–187.
Cheng G Q, Xiao Y, Jing L Q, *et al.* Effects of slow-release fertilizer treatments on yield and population quality of super-high yield summer maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(30): 182–187.
- [22] Douglas L A, Riaz A, Smith C J. A semimicro method for determining total nitrogen in soils and plant material containing nitrite and nitrate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(2): 431–433.
- [23] 强生才. 施氮对不同基因型玉米/小麦产量和水氮利用的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2016.
Qiang S C. Effects of nitrogen application rates on yield of summer maize/winter wheat and water and nitrogen use efficiencies[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2016.
- [24] 马忠明, 孙景玲. 施氮量对间作玉米土壤硝态氮累积量及氮肥利用率的影响[J]. *核农学报*, 2012, 26(9): 1305–1310.
Ma Z M, Sun J L. Effects of nitrogen rates on NO₃-N accumulation and nitrogen use efficiency under maize and wheat intercropped system[J]. *Journal of Nuclear Agriculture Sciences*, 2012, 26(9): 1305–1310.
- [25] Kiyomoto N, Maehera T. Effects of yields by basal dressing using controlled-release fertilizers on precocity pumpkin[J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 73(5): 531–535.
- [26] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(3): 562–564.
- [27] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对甘肃河西地区滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 597–605.
Zhang Y X, Zhang F C, Zou H Y, *et al.* Effects of soil water regulation at different growing stages on nitrogen uptake and utilization of spring wheat in the Hexi Region, Gansu Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 597–605.
- [28] 陈玉花, 张清山, 陆博, 等. 小麦茎秆性状与单穗重的相关分析与通径分析[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(11): 147–152.
Chen Y H, Zhang Q S, Lu B, *et al.* Correlation and path analysis of wheat stem traits and single ear weight[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(11): 147–152.
- [29] 郭金金. 尿素掺混缓释氮肥对夏玉米/冬小麦生长和氮素利用的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2018.
Guo J J. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on summer maize/winter wheat growth and nitrogen utilization[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2018.
- [30] 冯志文, 宋凯, 王翠玲, 张继祥. 控释复合肥对草莓生长发育、品质及经济效益的影响[J]. *山东农业科学*, 2011, (12): 73–76.
Feng Z W, Song K, Wang C L, Zhang J X. Effects of controlled release fertilizer on growth, quality and economic benefit of strawberry[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011, (12): 73–76.
- [31] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. *水土保持学报*, 2007, (2): 49–52.
Du J J, Wu Y L, Tian J L, *et al.* Effect of several controlled /slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, (2): 49–52.

- [32] Zheng S X, Nie J, Dai P A, Zheng Y J. Nitrogen recovery and nitrate leaching of controlled release nitrogen fertilizer in irrigated paddy soil[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2004, (3): 2–10.
- [33] 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 W P, Sun Z, Wu L, *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.
- [34] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 谢英荷. 控释肥料配施对冬小麦产量和氮肥利用的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(6): 492–497.
 Li L, Hong J P, Wang H T, Xie Y H. Effects of controlled release urea combined with conventional urea on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(6): 492–497.
- [35] 李伟, 李絮花, 董静, 林治安. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 629–635.
 Li W, Li X H, Dong J, Lin Z A. The appropriate mixing ratio of control-released urea and common urea in winter wheat production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 629–635.
- [36] 何杰, 张敬昇, 王昌全, 等. 包膜控释氮肥配施尿素对冬小麦产量与氮素积累及利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 34–42.
 He J, Zhang J S, Wang C Q, *et al.* Effects of coated controlled-release nitrogen fertilizer combined with urea on yield, nitrogen accumulation and utilization of wheat[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(3): 34–42.
- [37] 于立芝, 李东坡, 俞守能, 等. 缓/控释肥料研究进展[J]. *生态学报*, 2006, (12): 1559–1563.
 Yu L Z, Li D P, Yu S N, *et al.* Research advances in slow / controlled release fertilizers[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, (12): 1559–1563.
- [38] 孙克刚, 和爱玲, 李丙奇. 砂姜黑土区控释尿素与普通尿素掺混对小麦-玉米轮作定位产量及氮肥利用率的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2010, 25(2): 63–64.
 Sun K G, He A L, Li B Q. The effect of controlled-release urea and conventional urea on wheat-corn crop rotation yield and nitrogen utilization efficiency in lime concretion black soil area[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2010, 25(2): 63–64.
- [39] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释掺混尿素对稻麦产量及氮素利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(3): 288–298.
 Zhang J S, Li B, Wang C Q, *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.
- [40] 常凤, 王海标, 陶静静, 等. 减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(25): 1–6.
 Chang F, Wang H B, Tao J J, *et al.* Combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate affect yield and N utilization efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(25): 1–6.
- [41] Dretsch G V, Bouwman A F, Knoop J M, *et al.* Global modeling of the fate of nitrogen from point and nonpoint sources in soils, groundwater, and surface water[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1115.
- [42] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, *et al.* Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111–124.
- [43] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 518–528.
 Wang Y, Feng G Z, Zhang T S, *et al.* Effects of mixed application of controlled-release N fertilizer and common urea on grain yield, N uptake and soil N balance in continuous spring maize production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 518–528.