

缓释尿素对两种土壤小麦氮素运转、产量和土壤无机氮的影响

袁嫚嫚, 邬刚, 孙义祥, 张祥明, 王文军, 曹哲伟

(养分循环与资源环境安徽省重点实验室(安徽省农业科学院土壤肥料研究所), 合肥 230031)

摘要: 为探明缓释尿素与普通尿素掺混比例对安徽小麦花后氮素运转特征和土壤氮素盈余的影响, 分别选择安徽省北方小麦产区小麦—玉米轮作和南方小麦产区小麦—水稻轮作方式, 土壤类型分别为两合土和黄棕壤, 设置不施氮肥处理(CK)、农民习惯处理(Ncon)、减少普通尿素用量的优化氮素处理(Nopt)、缓释尿素及其掺混普通尿素处理(SRU1、SRU2、SRU3)和普通尿素全部基施处理(SRU4), 分析了不同施肥处理在两种土壤上小麦花后氮素运转、产量、氮肥利用率和土壤无机氮积累量。结果表明: 与黄棕壤比较, 相同施肥处理两合土上小麦产量、花后氮素积累量和氮素运转量显著增加, 平均分别增加了71.8%, 199.1%和25.8%, 而氮素转移率和土壤氮素表观盈余量平均分别降低16.1%和49.7%。在两种土壤上, 与Ncon比较, 缓释尿素及其掺混普通尿素处理小麦产量差异不大, 显著提高了氮肥利用率, 黄棕壤和两合土上增幅分别达43.7%~91.9%和6.6%~26.9%, 以缓释尿素掺混普通尿素比例2:1处理(SRU2)最高; 与Nopt相比, 仅两合土上SRU2氮肥利用率显著提高。在小麦生育后期, 农民习惯施肥处理0—30 cm土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N积累量明显高于缓释尿素处理, 且土壤氮素盈余量高于其他处理。缓释尿素与尿素掺混实现了一次性简化施肥, 可保障小麦产量、提高氮肥利用率、减少土壤氮素盈余量及降低环境污染风险。

关键词: 小麦; 缓释尿素; 氮素运转; 产量; 氮肥利用率; 硝态氮; 铵态氮

中图分类号: S143.1; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0233-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.037

Effects of Slow-released Urea on Nitrogen Translation and Yield of Wheat and Soil Inorganic Nitrogen in Two Soils

YUAN Manman, WU Gang, SUN Yixiang, ZHANG Xiangming, WANG Wenjun, CAO Zhewei

(Anhui Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment,

Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031)

Abstract: In order to reveal the influence of the mix ratio between slow released urea (SRU) and ordinary urea on the nitrogen (N) translocation and soil mineral nitrogen accumulation of post-anthesis wheat, the effect of N managements of control (CK), conventional (Ncon), optimized (Nopt), different mix ratios of SRU to urea (SRU1, SRU2, SRU3), and only urea (SRU4) on post-anthesis N translocation, yield, nitrogen use efficiency (NUE), soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N accumulation of wheat was investigated via field experiments between the mixed soil and yellow-brown soil corresponding to the wheat-maize and wheat-rice rotation distributed over Anhui province. Results showed that the yield, the amount of post-anthesis N accumulation and translocation in mixed soil were higher than those in yellow-brown soil under the same treatment, which increased by 71.8%, 199.1% and 25.8% on average, respectively. However, N translocation rate and apparent surplus amount of soil mineral N decreased by 16.1% and 49.7% on average in mixed soil than those in yellow-brown soil, respectively. Compared to the Ncon, yield showed no obvious differences, but NUE was significantly higher under the treatments of SRUs, which increased by 43.7%~91.9% and 6.6%~26.9% between mixed soil and yellow-brown soil. The highest NUE was under the treatment of SRU2 (ratios of SRU to urea 2:1). Compared to the Nopt, NUE increased at significant level only under the treatment of SRU2 in mixed soil. There was more soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N accumulation in 0—30 cm soil layer in Ncon than in SURs in post-anthesis of wheat, while the accumulation soil mineral N showed

收稿日期: 2018-01-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200806); 安徽省农业科学院创新团队项目(18C1021)

第一作者: 袁嫚嫚(1983—), 女, 安徽宿州人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事生态环境与农业资源研究。E-mail: mmyuan@issas.ac.cn

通信作者: 孙义祥(1971—), 男, 安徽霍邱人, 博士, 副研究员, 主要从事养分资源综合管理研究。E-mail: sunyixiang@126.com

similar trend. The results showed it decreased accumulation soil mineral N under the treatments of SRUs in the late growth period of wheat with higher wheat yield and NUE. Therefore, one-time applying of the mix of SRU to urea could improve wheat yield, and reduce environmental pollution risk.

Keywords: wheat; slow-released urea; nitrogen translocation; yield; nitrogen use efficiency; soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$; soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

小麦是生育期长且需氮肥较多的粮食作物,籽粒形成过程中,源(叶)同化物的生成、运转及向库(籽粒)中的分配积累能力是制约产量的主要原因^[1]。一般认为小麦籽粒产量大部分来自花后光合物的积累,灌浆期同化物的分配、转运和积累具有重要意义,而籽粒氮素积累主要来自前期营养器官存储氮素的再分配^[2]。合理氮肥的运筹,例如追施拔节肥和孕穗肥,能够促进小麦花后籽粒各蛋白质组分和蛋白质总量的提高从而提高其产量和品质^[3]。但农民习惯采用雨后或灌溉后撒施尿素的方式追肥,受到气候和灌溉条件的限制,追肥需要额外的用工,造成小麦一次性施肥现象普遍存在。尿素“一炮轰”施肥方式忽视了资源和环境保护,导致土壤板结、酸化、硝酸盐淋失、面源污染等负面影响^[4]。缓/控释肥料为这一问题的解决提供了途径。

前人^[5-7]对缓/控释肥料增加小麦等作物产量和提高氮肥利用率进行了大量研究。相比普通尿素的氮素释放规律,缓/控释尿素通过改变内核粒子与交界环境中的扩散通量,可有效控制氮素释放速率^[8],促进作物生育后期的氮素供应。然而,缓/控释尿素释放特性和小麦生长受环境因素影响较大^[2,9-11],在安徽小麦花后产量形成的关键时期,缓释尿素是如何通过氮素运转而提高产量和氮肥利用率,降低硝态氮在土壤的残留,尚缺乏系统的研究。因此,选择安徽南北小麦产区,采用缓释尿素减量及缓释尿素与普通尿素掺混降低肥料成本的方式,研究缓释尿素对小麦产量、氮肥利用率及花后氮素运转和土壤无机氮的影响,以期缓释尿素在小麦上的减肥增效的推广应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月选择位于安徽省北部和南部小麦主产区的进行,具体试验地点为安徽省淮北市濉溪县古饶镇草庙村和宣城市宣州区文昌镇李家渡村。淮北试验地域属于半湿润带季风气候,土壤为两合土,耕层土壤属于粉砂壤土,砂黏适中,疏松多孔,土壤中水、气、热协调,是安徽省中高产地土壤,年平均日照时间 2 293.7 h,年平均气温 14.5 ℃,年平均降水量 852.4 mm,前茬作物为玉米;宣城试验地属于亚热带湿润季风气候,土壤为黄棕壤,耕层土壤属于壤质土,具有

残积黏化,自然肥力较高,年平均日照时间 1 784.1 h,年平均气温 16.1 ℃,年平均降水量 1 317.5 mm,前茬作物为水稻。小麦品种为烟农 19。土壤耕作层(0—20 cm)基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

地点	土壤类型	pH	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
淮北	两合土	7.10	15.27	137.0	14.45	71.9
宣城	黄棕壤	5.53	16.56	70.0	17.05	99.0

1.2 试验设计

试验设置 7 个处理(表 2),4 次重复,小区面积 40 m^2 (5 m×8 m),随机区组排列。氮肥的基肥与磷、钾肥于小麦播种前撒施,然后翻耕;磷、钾肥用量分别为 75 kg/hm^2 P_2O_5 、60 kg/hm^2 K_2O 。小麦拔节期追施尿素(淮北:2014 年 3 月 28 日,宣城:2014 年 3 月 29 日)。肥料品种分别为普通尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。缓释尿素为高聚物包膜肥料,由 Agrium Advanced Technologies Company 提供,释放期为 50 d,含 N 44%。

小麦人工开沟条播,行距 20 cm,播深 3~5 cm。淮北和宣城两地分别于 2013 年 10 月 15 日和 10 月 18 日播种,播种量 165 kg/hm^2 ,分别于 2014 年 6 月 9 日和 5 月 28 日收获,田间管理按照当地栽培技术统一进行。

表 2 氮肥施用方案

处理	氮素用量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			说明
	基肥	追肥	合计	
CK	0	0	0	对照,不施氮肥
Ncon	100	150	250	农民习惯处理;普通尿素
Nopt	60	120	180	优化氮素处理;普通尿素
SRU1	180	0	180	100%SRU
SRU2	180	0	180	67%SRU+33%普通尿素
SRU3	180	0	180	33%SRU+67%普通尿素
SRU4	180	0	180	100%普通尿素

注:SRU(Slow-released Urea)为缓释尿素。

1.3 样品采集与测定方法

小区按面积平均分为两部分,一部分用于植株和土壤样品采集,一部分用于收获测产。

1.3.1 小麦干物质及氮素积累 分别于扬花期(淮北试验地:2014 年 4 月 30 日,宣城试验地:2014 年 4 月 24 日)和成熟期采 1 m 长小麦样品,杀青、烘干后测干物质重;植株全氮用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,用开氏定氮法测定植株全氮含量。

1.3.2 小麦产量 小麦成熟后,小区测产部分 20 m² 收获脱粒测产,产量以风干质量表示。

1.3.3 土壤硝态氮 分别于小麦扬花期和成熟期用取土器采 0—30,30—60,60—90 cm 土壤样品,样品采集后用冰盒保存立即运回,后在 4 ℃ 保存。将鲜土样掰碎混匀,称取 5 g,加 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液 50 mL,振荡 1 h,过滤,用 Bran+Luebbe 公司全自动流动分析仪 Autoanalyzer III 测定土壤硝态氮和铵态氮含量。同时测鲜土含水量。

1.4 数据计算与分析

氮素积累量 = 氮素含量 × 干物质质量^[12]

籽粒蛋白质含量 = 氮素含量 × 5.7^[12]

花后氮素积累量 = 开花时营养器官氮素积累量 - 成熟时(籽粒除外)氮素积累量^[13-14]

花后氮素转移率(%) = 花后氮素积累量 / 开花时氮素积累量 × 100%^[13-14]

花后氮素积累贡献率(%) = 花后氮素积累量 / 籽粒氮素积累量 × 100%^[13-14]

氮素收获指数 = 籽粒氮素积累量 / 地上部氮素积累量^[14]

氮肥吸收利用率(%) = (施氮处理地上部氮素积累量 - 不施氮区地上部氮素积累量) / 施氮量 × 100%^[14]

氮肥农学效率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量^[14]

土壤硝态氮(铵态氮)积累量 = 土层厚度 × 土壤容重 × 土壤硝态氮(铵态氮)含量 / 10^[15]

土壤氮素表观盈亏 = (土壤无机氮起始总量 + 施氮量) - (土壤无机氮残留总量 + 作物吸氮量)^[16]

应用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行处理和统计分析。处理间比较采用 One-way ANOVA 分析,差异显著性分析用 Duncan 法。

2 结果与分析

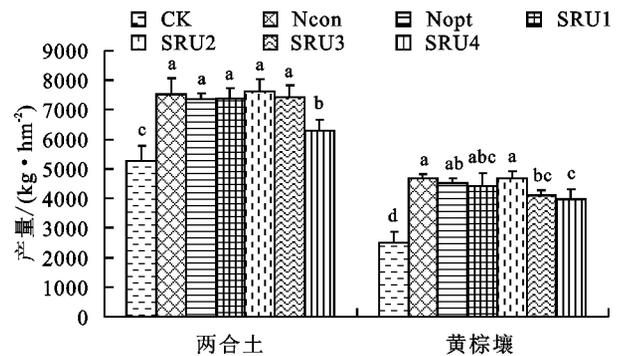
2.1 氮肥处理对小麦产量的影响

与农民习惯施肥处理(Ncon)相比,减少氮素用量 70 kg/hm² 的优化施肥处理和缓释尿素一次性施肥处理,小麦不减产,其中缓释尿素掺混普通尿素比例 2:1 处理(SRU2)小麦产量最高,一次性基施普通尿素处理(SRU4)在两合土和黄棕壤上分别减产 16.4% 和 14.9%(图 1)。不同施肥处理,2 种土壤上小麦产量差异较大,两合土上小麦产量显著高于黄棕壤的,增幅达 57.7%~111.2%。

2.2 氮肥处理对小麦花后氮素运转的影响

小麦花前氮素积累量明显高于花后氮素积累量,小麦成熟期氮素主要源自营养器官氮素的转运,而不同土壤上花后氮素积累对籽粒氮贡献差异较大(表 3)。两合土上小麦花后再分配氮是花后积累量的 1.0~3.6 倍,黄

棕壤上为 2.0~8.6 倍。相同施肥处理,两合土上小麦扬花期氮素积累量和花后氮素贡献率均高于黄棕壤的,分别增加了 13.3%~173.0% 和 90.3%~431.3%;两合土上小麦 Ncon 花后氮素积累量和 SRU2 花后氮素转移量小于黄棕壤的;小麦花后氮素运转率黄棕壤比两合土增加了 10.6%~36.7%。



注:不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

图 1 不同施肥处理两种土壤小麦产量

施肥肥处理间,小麦扬花期地上部氮素积累量在两种土壤上的差异不明显,但尿素一次性基施 SRU4 有低于其他氮素处理的趋势。在两合土上,小麦 SRU2 花后氮素积累量显著高于其他处理,而黄棕壤上小麦花后氮素积累量以 Ncon 的最高,其花后氮素积累量对籽粒的贡献率亦显著高于其他氮肥处理,但其小麦花后氮素运转率最低,与其他氮肥处理间差异不明显。

2.3 氮肥处理对小麦氮素利用率的影响

相同施肥处理,两合土小麦成熟期籽粒氮素积累量和地上部氮素积累量分别比黄棕壤增加了 18.6%~116.7% 和 32.9%~166.4%,但氮素收获指数降低了 4.9%~24.3%,其中添加缓释尿素处理的氮素收获指数变幅较小,SRU1、SRU2 和 SRU3 下降了 4.9%~5.1%(表 4)。氮肥处理增加了小麦籽粒蛋白质含量,但不同处理间差异不明显,而黄棕壤小麦籽粒蛋白质含量平均比两合土的增加了 17.1%。两种土壤上,氮肥利用率和氮肥农学利用率均以 SRU4 最低,Ncon 仅高于 SRU4 而低于其他处理,SRU2 最高。在两合土上,SRU2 氮肥利用率分别比 SRU4 和 Ncon 提高了 143.7% 和 91.9%,而在黄棕壤上增加了 37.2% 和 26.9%,前者增幅明显高于后者。与氮肥利用率结果相似,两合土 SRU2 氮肥农学利用率分别比 SRU4 和 Ncon 提高了 130.6% 和 39.8%,黄棕壤增加了 47.9% 和 39.9%。

2.4 氮肥处理对不同土壤类型小麦花后土壤无机氮的影响

2.4.1 氮肥处理对不同土壤类型小麦花后土壤硝态氮的影响 两种土壤上,不同处理土壤硝态积累量时

空变化趋势相似(图 2)。随小麦生育进程的推移,不同深度土壤硝态氮积累量明显下降,扬花期不同深度土壤硝态氮积累量高于成熟期的。在扬花期,两种土壤上 Ncon 和 Nopt 处理 0—30 cm 土壤硝态氮积累量明显高于其他土层及处理,可能与这两个处理小麦拔节期追施了普通尿素,未被小麦吸收利用的尿素转化为硝态氮形态存储在土壤中有关系。其他氮肥处理

不同深度土壤硝态氮积累量变化不大,且在 30—60, 60—90 cm 土壤硝态氮积累量与 Ncon 和 Nopt 处理差异不大。在成熟期,两种土壤上 Ncon 处理 0—30, 30—60 cm 土壤硝态氮积累量明显高于其他处理, Nopt 与 SRU1 处理 0—30 cm 土壤硝态氮积累量差异不大,但显著高于缓释氮肥掺混普通尿素的两个处理(SRU2 和 SRU3)和 SRU4。

表 3 不同施肥处理小麦花后氮素运转

土壤类型	处理	扬花期氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	花后氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	花后氮素运转量/ (kg·hm ⁻²)	花后氮素 运转率/%	花后氮素积累 贡献率/%
两合土	CK	93.08±11.13b	37.89±6.60de	60.33±4.57c	64.92±5.57a	61.56±4.92c
	Ncon	163.53±27.13a	31.42±14.21e	113.55±13.16ab	69.44±5.59a	79.07±7.38a
	Nopt	148.10±23.18a	52.25±7.42c	105.40±23.59ab	70.44±8.00a	66.20±8.16bc
	SRU1	156.73±20.76a	46.91±7.34cd	115.70±9.18a	73.88±4.11a	71.20±3.22abc
	SRU2	131.20±13.01a	89.15±8.57a	85.48±14.40bc	64.93±8.89a	48.78±5.98d
	SRU3	133.29±14.03a	75.51±9.85b	90.43±34.14ab	66.05±15.19a	53.01±11.95cd
	SRU4	133.88±32.27a	33.74±7.81de	96.67±10.92ab	72.08±4.54a	74.09±5.73ab
	CK	34.09±4.44c	15.07±7.29c	30.26±4.05d	88.72±0.94a	32.35±3.95a
黄棕壤	Ncon	111.50±4.86a	35.17±5.61a	87.11±3.15ab	78.16±1.72c	28.69±3.78a
	Nopt	107.88±4.45ab	29.49±3.23a	88.17±6.95ab	81.63±3.05b	24.89±7.90ab
	SRU1	115.01±4.27a	10.94±3.37c	94.08±5.70ab	81.75±2.11b	13.40±4.99c
	SRU2	115.76±4.00a	22.50±2.83b	95.08±5.35a	82.10±2.14b	18.93±7.12bc
	SRU3	108.23±9.82ab	15.78±5.94bc	86.74±6.01bc	79.98±2.91bc	15.16±5.46c
	SRU4	101.72±2.93b	12.38±2.57c	84.48±2.89c	83.05±1.63b	14.69±6.39c

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 4 不同施肥处理小麦氮素利用率

土壤类型	处理	籽粒蛋白质含量/ (g·kg ⁻¹)	籽粒氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	地上部氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	氮收获 指数	氮肥 利用率/%	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)
两合土	CK	10.75±0.54b	98.22±7.45d	130.96±9.37c	0.74±0.03cd	—	—
	Ncon	10.95±1.32ab	144.97±24.09bc	194.95±24.44a	0.72±0.02d	26.93±6.54c	9.42±4.10b
	Nopt	12.21±1.24ab	157.65±19.95ab	200.35±17.11a	0.79±0.02ab	39.33±5.03b	11.58±3.37ab
	SRU1	12.54±0.59ab	162.61±12.66ab	203.64±18.07a	0.79±0.02ab	38.70±3.24b	11.83±3.97ab
	SRU2	13.05±0.63a	174.63±12.25a	220.36±7.42a	0.81±0.04a	51.69±8.32a	13.17±3.18a
	SRU3	12.72±2.57ab	165.94±33.51ab	208.79±29.68a	0.79±0.02ab	48.38±10.64ab	12.11±4.44ab
	SRU4	11.88±1.40ab	130.40±9.36c	167.62±11.02b	0.77±0.02bc	21.21±5.18c	5.71±1.53c
	CK	10.38±0.40b	45.33±6.71c	49.16±6.49d	0.92±0.02a	—	—
黄棕壤	Ncon	14.89±0.81a	122.28±3.76a	146.67±4.86a	0.83±0.02bc	39.00±1.94bc	8.78±0.58b
	Nopt	14.82±0.81a	117.65±3.98a	137.37±6.02a	0.86±0.01b	49.00±3.34a	11.30±0.85a
	SRU1	13.52±1.08a	104.58±10.77b	125.52±10.66b	0.83±0.02bc	42.42±5.92b	10.68±2.53ab
	SRU2	14.22±0.61a	117.59±5.42a	138.26±5.62a	0.85±0.01bc	49.50±3.12a	12.29±1.20a
	SRU3	14.26±1.27a	102.52±4.27b	124.01±4.19bc	0.83±0.02c	41.58±2.33bc	8.94±0.95b
	SRU4	13.85±0.93a	96.87±8.20b	114.11±7.87c	0.85±0.02bc	36.08±4.37c	8.31±1.88b

2.4.2 氮肥处理对不同土壤类型小麦花后土壤铵态氮的影响 从图 3 可以看出,不同类型小麦花后土壤铵态氮积累量明显低于硝态氮积累量,但时空变化趋势与土壤硝态氮积累量相似,即不同氮肥处理土壤铵态氮积累量随小麦生育进程的推移积累量下降,随土壤深度的增加而减少。两种土壤上,不同深度缓释尿素处理(SRU1、SRU2、SRU3)土壤铵态氮积累量显著低于 Ncon,但与 Nopt 差异不显著。土壤中残留

过多未被作物吸收利用的铵态氮,可能经硝化作用加剧土壤硝酸盐积累。

2.4.3 氮素处理对不同土壤—小麦体系中氮素盈亏量的影响 根据土壤无机氮和小麦吸氮动态,运用氮平衡模型计算了整个生育期土壤—小麦体系中的氮素盈亏量(表 5)。氮输入量包括氮肥用量和起始无机氮两部分;氮输出量包括作物携出和残留无机氮两部分。氮输入量减去氮输出量为氮素的表现盈余。

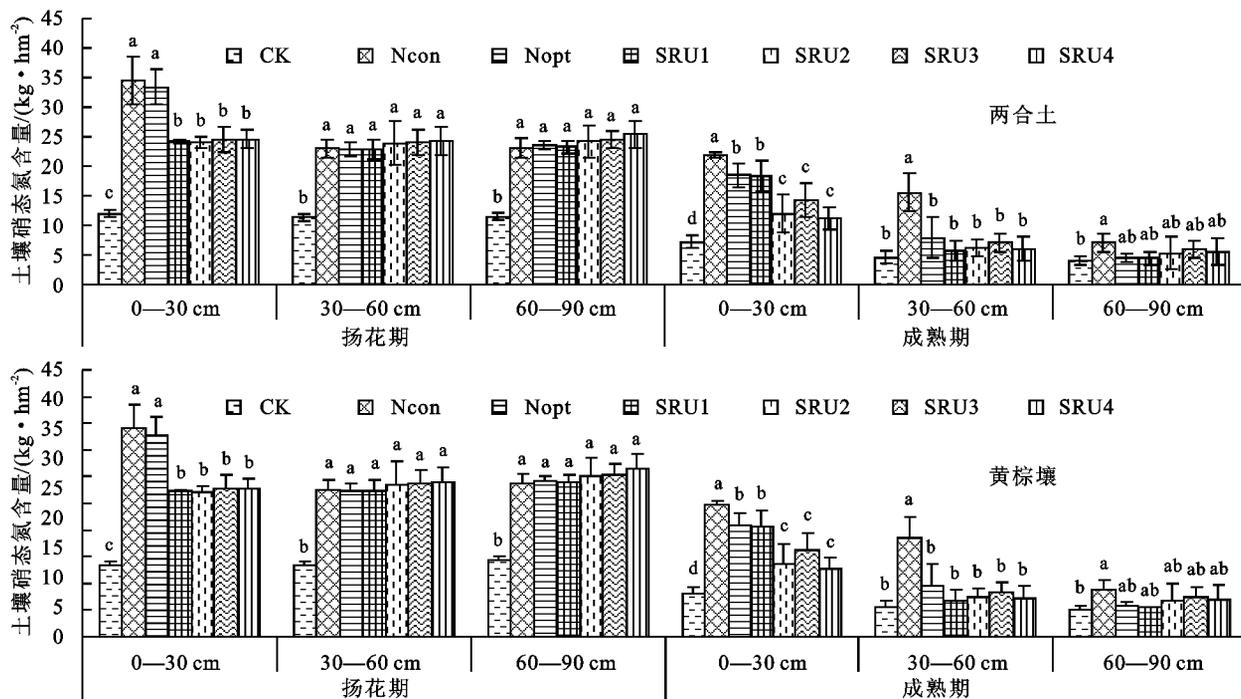


图 2 不同施肥处理两种土壤小麦花后土壤硝态氮积累量的变化

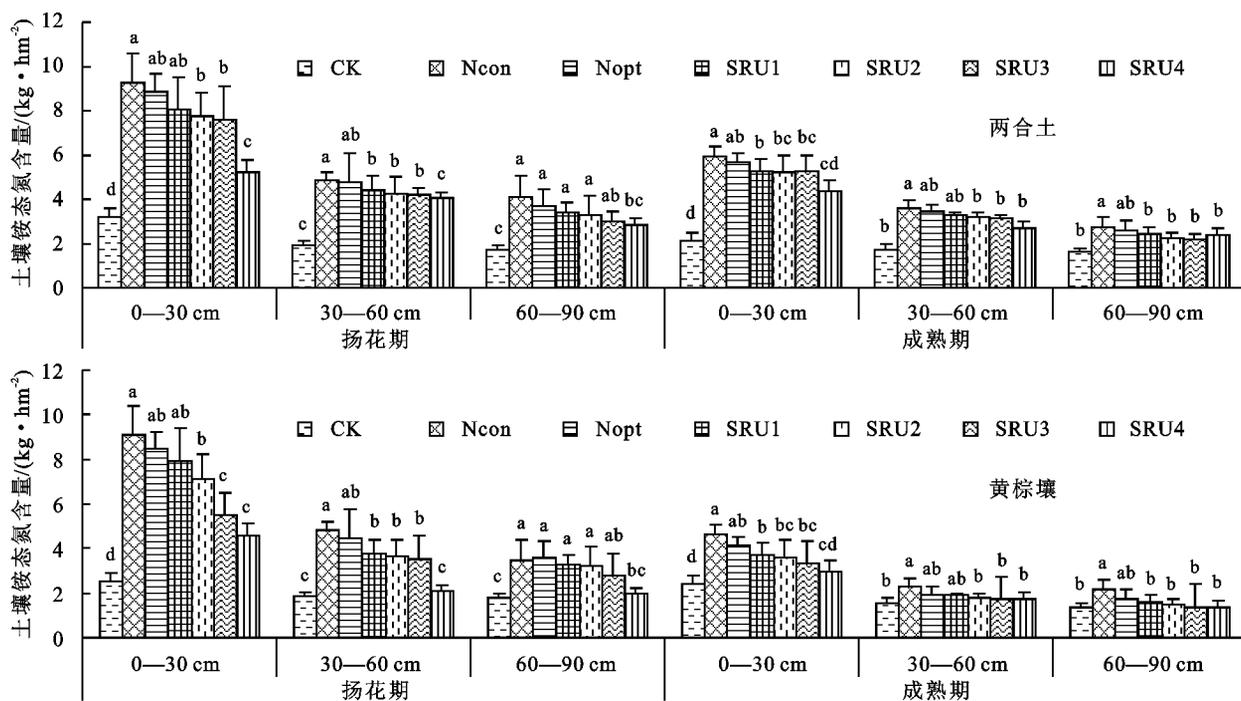


图 3 不同施肥处理两种土壤小麦花后土壤铵态氮积累量的变化

由表 5 可知,在小麦整个生育期内各处理均存在氮素的表观盈余,减少氮肥用量明显降低氮素的表观盈余量。黄棕壤土壤氮素的表观盈余量大大高于两合土的,其中 CK 增加了 7.8 倍,不同氮肥处理增加了 0.5~1.4 倍,黄棕壤起始无机氮比两合土增加了 36 kg/hm²,而小麦吸收氮素减少了 22.69~63.42 kg/hm²,表明两种土壤氮素的表观盈余量差异主要是由土壤基本性质及其作物生长环境造成。两种土壤上,Ncon 土壤氮素的表观盈余量最高,主要与土壤残留无机氮较高有关,盈余的无机氮尤其硝态氮向土壤深

层淋洗的可能性越大。缓释尿素处理尤其是缓释尿素掺混普通尿素处理比 Ncon 降低了土壤氮素的表观盈余量,两合土和黄棕壤分别降低了 37.5%~44.5% 和 11.8%~17.0%。因此,缓释尿素处理减少氮肥用量,有利于降低土壤氮素的表观盈余量,降低环境污染的风险。

3 讨论

小麦发育及产量的形成受日照时间、降水量、平均温度等气候因素和土壤条件影响^[2,9-11]。本研究中,两合土上小麦是安徽小麦的高产区,气候因素和

土壤条件有利于增加小麦有效穗数,提高生育期吸收养分,促进小麦物质积累及花后物质运转,增加小麦产量,而黄棕壤上小麦因光照时间减少、降水增加和平均温度升高等因素影响,产量较两合土上的大幅下降。研究表明,等氮条件下缓释尿素或缓释尿素掺混尿素处理促进小麦增产^[6-7]。本研究中,与 Ncon 相比,缓释尿素或与普通尿素掺混处理减少了氮素用量

70 kg/hm²,实现一次性施肥而小麦不减产。这可能是由于冬天温较低,小麦生长较慢,需肥较少,缓释尿素或缓释尿素掺混处理在温度低的条件下,养分释放较慢^[17],而在生育中后期,缓释尿素持续的氮素供应,可能增强了光合作用,增加了作物器官硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸脱氢酶等氮同化与代谢关键酶的含量和活性,间接影响了作物产量^[18]。

表 5 不同施肥处理两种土壤—小麦体系中氮素盈亏量的变化

单位:kg/hm²

土壤类型	处理	氮输入量		氮输出量		表观盈余量
		施氮量	起始无机氮	小麦携出	残留无机氮	
两合土	CK	0	165	130.96±9.37c	21.23±2.72e	13.79±2.84c
	Ncon	250	165	194.95±24.44a	56.86±3.68a	163.19±26.81a
	Nopt	180	165	200.35±17.11a	42.68±6.58b	101.97±20.44b
	SRU1	180	165	203.64±18.07a	39.43±1.13bc	101.93±17.10b
	SRU2	180	165	220.36±7.42a	34.14±4.17cd	90.51±5.17b
	SRU3	180	165	208.79±29.68a	37.99±2.18cd	98.21±31.61b
	SRU4	180	165	167.62±11.02b	32.24±6.57d	145.14±13.62a
	CK	0	201	49.16±6.49d	23.88±2.86d	121.41±6.57e
黄棕土	Ncon	250	201	146.67±4.86a	61.26±4.53a	252.58±2.31a
	Nopt	180	201	137.37±6.02a	43.83±6.76b	204.70±6.90d
	SRU1	180	201	125.52±10.66b	40.21±1.49bc	222.68±11.02c
	SRU2	180	201	138.26±5.62a	34.39±5.98c	214.80±3.07cd
	SRU3	180	201	124.01±4.19bc	38.52±3.00bc	225.71±6.52c
	SRU4	180	201	114.11±7.87c	32.84±6.32c	237.44±12.27b

小麦对氮素的吸收、积累及其向籽粒的运输受环境条件的限制,氮素运转量高,运转效率不一定高^[1-2]。花后植株氮素的分配量与小麦产量和品质以及氮素利用效率密切相关^[4]。本研究中,两种土壤上小麦籽粒氮素积累主要来自花后营养器官存储氮素的再分配,两合土小麦扬花期地上部氮素积累量和花后氮素运转量明显高于黄棕壤,但其花后氮素运转率低于黄棕壤,而两合土小麦生育期比黄棕壤长了仅两周,可能与较多的氮素分配到根系中对延缓根系衰老、维持花后较高的根系活力有关^[3]。两种土壤因环境不同,小麦花后营养器官再分配的氮与花后从土壤中吸收积累的氮量的倍数关系变幅较大,其倍数关系两合土和黄棕壤分别为 1.0~3.6 倍和 2.0~8.6 倍,黄棕壤小麦比两合土小麦更依赖氮素运转提高氮素利用效率。

硝态氮是麦季土壤氮素损失的主要形态,一般认为土壤硝态氮残留越多,其向下淋洗损失风险越大^[15,19]。土壤氮素的表观盈余量与施氮量关系密切,过量施氮肥可导致土壤中剩余氮素大幅增加,并多以硝态氮形式积累在土壤剖面中^[19]。当小麦生育期内降雨强度大于土壤下渗速度时,此时土壤耕层硝态氮含量较多,则可能随径流而损失^[15]。本试验 Ncon 在小麦拔节期追施了大量氮肥,导致耕层硝态氮积累量增加,存在径流损失的风险,并表现出淋洗的趋势,降低了氮肥利用率。采用缓释尿素掺混尿素的方式可以解决一次性全部施尿素前期供肥过后期脱肥和一次性全部施缓释尿素初期供肥滞后的问

题,促进了小麦氮素吸收和运转,减少了土壤氮素的表观盈余量,提高了氮肥利用率。黄棕壤上,由于小麦氮素吸收量较少,导致土壤氮素的表观盈余量比两合土明显增加。因此,黄棕壤上可进一步减少小麦氮肥用量,以减少土壤氮素盈余量和降低环境风险。

大量研究表明,满足小麦全生育期生长的缓释尿素与普通尿素掺混比例有 1:1,2:1,1:2,4:6 等^[8]。而评估缓释尿素与普通尿素掺混比例是否适于推广应用,则需从粮食安全、环境和生态效益等方面全面考虑。本研究两种土壤上,缓释尿素掺混普通尿素比例 2:1 处理(SRU2)小麦产量、氮肥利用率、经济效益高于其他处理,而土壤氮素的表观盈余量较低,可认为是一种适宜的一次性施肥方式。

4 结论

不同土壤上,小麦氮素积累运转特征存在较大差异,缓释尿素处理提高小麦氮肥利用率的机理不同。两合土小麦扬花期氮素积累量和花后氮素转运费及积累量高于黄棕壤。黄棕壤小麦花后氮素转运率显著高于两合土的。缓释尿素分别通过提高黄棕壤花后氮素积累量和转运费及提高两合土花后氮素转运率达到提高小麦氮肥利用率的结果。

与农民习惯施肥处理相比,缓释尿素及其与普通尿素掺混处理减少氮素用量 70 kg/hm²,实现了一次性简化施肥,降低了土壤氮素的表观利用率,小麦不减产。两种土壤上,缓释尿素掺混普通尿素比例 2:

1 处理(SRU2)小麦产量、氮肥利用率、生态效益高于其他处理,可作为安徽小麦种植区域适宜的缓释尿素和普通尿素掺混比例。

参考文献:

- [1] 范仲卿,赵广才,田奇卓,等. 拔节期至开花期控水对冬小麦氮素吸收运转的影响[J]. 核农学报,2014,28(8):1478-1483.
- [2] 范雪梅,戴廷波,姜东,等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):63-67.
- [3] 丁锦峰,陈芳芳,王云翠,等. 后期追氮时期对扬麦 20 花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2012,33(3):56-62.
- [4] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):1-8.
- [5] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, quality of wheat[J]. *Agronomy Journal*,2011,103(2):479-485.
- [6] 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.
- [7] 袁媛媛,邹刚,孙义祥. 淮北地区缓释尿素对小麦生长、氮肥利用及土壤硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015,52(3):29-33,78.
- [8] Trinh T H, Kishaari K, Shuib A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and decay release[J]. *Biosystems Engineering*,2015,130:34-42.
- [9] 程冬冬,窦午红,赵贵哲,等. 高分子缓/控释肥氮磷养分释放特征及影响因素研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(3):484-492.
- [10] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. *European Journal of Agronomy*,2007,26(3):179-186.
- [11] 金之庆,石春林,葛道阔,等. 长江下游平原小麦生长气候变化特点及小麦发展方向[J]. 江苏农业学报,2001,17(4):193-199.
- [12] 何照范. 籽粒粮油品质及其分析技术[M]. 北京:中国农业出版社,1985.
- [13] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. *Plant Soil*,1981,58:177-204.
- [14] 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):143-149.
- [15] 石玉,于振文. 施肥量及低追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J]. 生态学报,2006,26(11):3362-3369.
- [16] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [17] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility[J]. *Field Crops Research*,2015,184:65-73.
- [18] 吴晓静,江海东,周琴. 花后酸雨和渍水胁迫对小麦氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质组成的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(1):26-33.
- [19] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 施氮和秸秆还田对小麦一玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报,2013,50(3):564-573.
- [18] 梁斌,李俊良,杨学云,等. 施肥对麦田土壤可溶性有机氮的影响[J]. 生态学报,2016,36(14):4430-4437.
- [19] 赵满兴,周建斌,陈竹君,等. 有机肥中可溶性有机碳、氮含量及其特性[J]. 生态学报,2007,27(1):297-403.
- [20] Liang B, Yang X Y, Murphy D V, et al. Fate of ¹⁵N-labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2013,49(8):977-986.
- [21] 彭银燕,黄运湘,孙梅. 长期施肥条件下水稻土有机氮组分及矿化特性研究[J]. 水土保持学报,2012,26(5):173-176.
- [22] 王媛,周建斌,杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(6):1173-1180.
- [23] 巨晓棠,边秀举,刘学军,等. 旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(3):251-259.

(上接第 232 页)

- [13] 陶瑞,唐诚,李锐,等. 有机肥部分替代化肥对滴灌棉田氮素转化及不同形态氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(1):50-56.
- [14] 张国娟,濮晓珍,张鹏鹏,等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2624-2634.
- [15] 张亚亚,李军,郭颖,等. 土壤可溶性有机氮的研究进展[J]. 生态学杂志,2016,35(6):1661-1669.
- [16] Neff J C, Chapin F S III, Vitousek P M. Breaks in the cycle: Dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,2003,1(4):205-211.
- [17] Ros G H, Hoffland E, van Kessel C, et al. Extractable and dissolved soil organic nitrogen: A quantitative assessment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2009,41(6):1029-1039.