

缓控释掺混尿素对章丘大葱—小麦产量、效益及土壤氮素的影响

张玉凤^{1,2}, 沈玉文¹, 王江涛¹, 刘兆辉¹, 陈剑秋²,

张强², 董亮¹, 边文范¹, 田慎重¹, 罗加法¹

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所,农业部废弃物基质化利用重点实验室,

山东省植物营养与肥料重点实验室,山东省环保肥料工程技术研究中心,济南 250100;

2.金正大生态工程集团股份有限公司,养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室,山东 临沭 276700)

摘要: 为了筛选出适合章丘大葱—小麦的缓控释尿素(CRU)与普通尿素(U)掺混比例,实现缓控释肥的一次性施用增产增效。采用田间定位试验方法,探讨 CRU 与 U 不同掺混比例对章丘大葱—小麦产量、氮肥表观利用率、经济效益和土壤氮素等指标的影响。结果表明,与习惯施肥相比,50% CRU+50% U、70% CRU+30% U 处理两季大葱总产量提高 2.2%~6.0%,两季小麦总产量提高 4.3%~5.2%;大葱季 50% CRU+50% U、70% CRU+30% U 氮肥表观利用率分别提高 3.44~8.48, 2.74~3.77 个百分点,小麦季 50% CRU+50% U、100% CRU 氮肥表观利用率分别提高 6.41~6.96, 3.00~6.98 个百分点;大葱季 50% CRU+50% U、70% CRU+30% U 效益分别增加 10 783.93, 5 823.04 元/hm²;小麦季 50% CRU+50% U、70% CRU+30% U 效益分别增加 2 035.33, 1 448.24 元/hm²;0—20 cm 100% CRU、70% CRU+30% U 土壤硝态氮含量高于习惯施肥,20—100 cm 土层含有缓控释肥处理的土壤硝态氮的累积高于习惯施肥,而且呈现缓控释肥掺混比例越高,保留的养分量越高。综合各项指标,50% CRU+50% U 是应用在章丘大葱—小麦上的最佳配比,其次为 70% CRU+30% U,这 2 个配比能够实现缓控释肥一次性施用,同时提高氮肥表观利用率,增加经济效益,延长土壤供氮能力。

关键词: 缓控释尿素; 掺混比例; 章丘大葱; 小麦

中图分类号:S145.6; S512.1; S663.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0231-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.033

Effects of Mixed Application of Slow- and Controlled-Release Urea on Yield, Benefit and Soil Nitrogen of Zhangqiu Onion-Wheat

ZHANG Yufeng^{1,2}, SHEN Yuwen¹, WANG Jiangtao¹, LIU Zhaohui¹, CHEN Jianqiu²,

ZHANG Qiang², DONG Liang¹, BIAN Wenfan¹, TIAN Shenzhong¹, LUO Jiafa¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of

Agricultural Science, Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture,

Shandong Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Shandong Provincial Engineering

Research Center of Environmental Protection Fertilizers, Jinan 250100;2.Kingenta Ecological Engineering

Group Co., Ltd., State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Linshu, Shandong 276700)

Abstract: The purpose of this study was to screen out the appropriate mixing ratio of slow-controlled-release urea (CRU) and common urea (U) suitable for Zhangqiu onion-wheat, and to realize the high efficiency of one-time application of slow-controlled-release fertilizer. Field experiments were conducted to investigate the effects of different mixing ratios of CRU and U on yield, apparent utilization rate of nitrogen fertilizer, economic benefits and soil nitrogen of Zhangqiu onion-wheat. The results showed that compared with conventional fertilization, the total yields of onion and wheat in two seasons increased by 2.2%~6.0% and 4.3%~5.2% respectively in 50% CRU+50% U and 70% CRU+30% U treatments, and the nitrogen apparent efficiency of 50% CRU+50% U and 70% CRU+30% U in spring onion season increased by 3.44~8.48, 2.74~3.77 percentage point respectively, 50% CRU+50% U and 100% CRU in wheat season increased

收稿日期:2019-07-25

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200701);国家小麦产业技术体系项目(CARS-03);山东省大科学计划项目(2018-001);“海外泰山学者”建设工程专项

第一作者:张玉凤(1972—),女,山东冠县人,研究员,博士,主要从事植物营养和新型肥料研究。E-mail:zhyfsdu@126.com

通信作者:张强(1979—),男,山东东营人,高级农艺师,博士,主要从事植物营养与肥料研究。E-mail:zhangqiang@kingenta.com

by 6.41~6.96, 3.00~6.98 percentage point respectively. In spring onion season, 50% CRU+50% U and 70% CRU+30% U increased 10 783.93 and 5 823.04 yuan/hm² respectively; in wheat season, 50% CRU+50% U and 70% CRU+30% U increased 2 035.33 and 1 448.24 yuan/hm² respectively. The nitrate nitrogen content in 0—20 cm soil under 100% CRU and 70% CRU+30% U was higher than that in conventional application. The accumulation of nitrate nitrogen in 20—100 cm soil layer with slow-controlled slow-release fertilizer was higher than that of conventional fertilization, and the higher the mixing ratio of slow-controlled-release fertilizer, the higher the retained nutrient content. Considering all the factors comprehensively, 50% CRU+50% U was the best ratio applied in Zhangqiu onion-wheat, followed by 70% CRU+30% U. These two ratios could achieve one-time application of slow-controlled release fertilizer, at the same time, improve the apparent efficiency of nitrogen fertilizer, increase economic benefits, and prolong the ability of soil to provide nitrogen.

Keywords: slow-controlled-release urea; mixing ratio; Zhangqiu Onion; wheat

章丘大葱是山东省著名的特产之一,被誉为“葱中之王”,2007 年被农业部认定为地理标志产品^[1]。章丘大葱具有高、白、脆、甜、营养丰富、耐寒易储藏、特殊的香味和辛辣味的特性^[2]。章丘大葱中维生素 C、氨基酸等含量比普通大葱丰富,而丙酮酸、粗纤维含量低,正是由于这种特质,章丘大葱更适合生食^[2]。据统计,山东省大葱生产面积为 8.5×10^4 hm²,约占全国的 16.2%,居全国首位^[3],而章丘大葱约占山东省大葱栽培总面积的 80% 以上。目前,章丘大葱价格达到 1.2~5.0 元/kg,纯收入达 3 万元/hm² 以上,对当地经济发展起了重要作用。由于大葱生长期较长,约 240 天,整个生育期需追肥 3~4 次,施肥成本高,费时费工,同时过量施肥导致大葱品质下降,肥料利用率低。近几年,随着农村劳动力的转移,章丘大葱种植面积开始减少,年均种植面积约 6 666.7 hm²。因此,为了保护该品牌的发展,亟需从栽培措施上降低劳动强度,提高大葱品质。

大量研究^[4-7]表明,缓控释肥在部分作物上能实现一次性施肥,是解决氮肥利用率低、劳动力短缺的有效措施之一。欧美国家缓控释肥主要用于花卉、草坪等园艺作物,日本主要用于水稻栽培^[8-10]。国内研究^[4,11]主要集中于大田作物小麦、玉米、水稻,缓控释肥比习惯施肥产量增加比例分别为小麦 6.5%~20.2%,玉米 0.59%~14.9%^[5],水稻 4.08%~16.99%^[6,12]。缓控释肥可以使肥料表观利用率提高 4~10 个百分点^[7,13],减少了氮向土壤深层淋溶和向大气排放的环境风险^[14-15],绿色环保,节省用工。

虽然缓控释肥具有提高肥料利用率^[7,13]、省工等优点,但是目前缓控释肥料价格是普通尿素的 1~4 倍^[16],农民难以接受成为不能大面积推广的原因之一;另一个原因是部分缓控释肥的养分释放受土壤温度的影响,当温度较低时养分几乎不释放,影响作物生长,如小麦越冬期。因此,在保证农民效益的前提下,降低缓控释肥料价格是解决缓控释肥大面积推广

的有效措施,其中的措施之一是采用缓控释氮肥与速效氮肥掺混。这种方式还能弥补单一缓控释肥在小麦生长前期气温低导致的养分释放不足,影响小麦分蘖的问题^[17]。国内学者初步确定了部分地区的最佳掺混量。在广东省台山市水稻上,掺混 25% 控释氮肥一次性施用是一种较优的氮肥运筹模式^[18];四川水稻土上水旱轮作下,添加 40% 控释氮肥处理对稻麦作物生长和产量的效果最优^[19],泰安棕壤上 50% CRU 玉米产量最高^[20]。上述结果表明,缓控释掺混比例具有区域、作物特异性,目前国内还未对该方面进行系统的研究。缓控释肥在章丘大葱—小麦轮作体系上的应用报道较少。鉴于上述原因,本研究采用田间定位试验方法,通过设置树脂包膜尿素与普通尿素不同配比,以作物产量、肥料表观利用率、经济效益、土壤氮素等为评价指标,筛选出适合章丘大葱—小麦轮作的最佳配比,为缓控释肥在章丘大葱—小麦上的田间应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物:章丘大葱“29—1 系列”;小麦“济麦 22”。

供试土壤:潮土,基本理化性质为 pH 8.16,有机质含量 11.23 g/kg,碱解氮含量 26.16 mg/kg,速效磷含量 6.0 mg/kg,速效钾含量 82.5 mg/kg,全氮含量 0.48 g/kg,全磷含量 0.46 g/kg,全钾含量 32.00 g/kg。

供试肥料:缓控释氮肥采用树脂包膜尿素,含氮量 43%,25℃ 静水中释放期 3 个月(金正大生态工程集团股份有限公司生产)。速效氮肥采用大颗粒尿素,含氮量 46%,速效磷肥采用重过磷酸钙(P₂O₅ 含量 44%),速效钾肥采用硫酸钾(K₂O 含量 50%)。

1.2 田间试验方法

试验设计:设 7 个处理,3 次重复,小区面积 30 m²。所有处理磷、钾肥用量均相同,磷肥为重过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,磷钾肥均基施。氮肥施用量和方式见试验设计。除对照外,施氮肥处理的 N—P₂O₅—K₂O

用量分别为大葱季为 375—120—330 kg/hm²,小麦季为 210—120—90 kg/hm²(表 1)。

表 1 试验设计

编号	处理简写	处理内容	施肥方式
T1	CK	对照,不施氮肥	
T2	FP	当地农民习惯施肥	基+追施
T3	100%U	100%速效氮肥	基施
T4	100%CRU	100%控释氮肥	基施
T5	70%CRU+30%U	70%控释氮肥+30%速效氮肥	基施
T6	50%CRU+50%U	50%控释氮肥+50%速效氮肥	基施
T7	30%CRU+70%U	30%控释氮肥+70%速效氮肥	基施

试验于 2013 年 6 月至 2015 年 6 月在山东省章丘市庆元村进行。该试验地种植模式为大葱—小麦—玉米轮作,大葱—小麦轮作 2~3 年后,进行小麦—玉米轮作,试验时间和作物分别为 2013 年 6—11 月种植大葱,2013 年 10 月至 2014 年 6 月种植小麦,2014 年 6 月—11 月种植大葱,2014 年 10 月至 2015 年 6 月种植小麦,共进行了 2 季大葱,2 季小麦,以下简称为 2013 大葱、2013 小麦、2014 大葱、2014 小麦。小麦采用人工播种,在大葱行内套种,小麦亩播种量为 165 kg/hm²。每年 10 月进行大葱育苗,翌年 6 月下旬移栽,11 月中旬收获。每个小区含有 6 行葱,行距为 80 cm,株距 6 cm。

施肥方法:大葱季氮肥施肥时期和方法为氮肥分 1 次基施、3 次追施,共 4 次施用,其中基肥量、第 1 次、第 2 次、第 3 次追施量分别占施肥总量的 15%,40%,15%,30%。开沟后将基肥撒施到沟中,覆土 5 cm,然后浇水。分别于 8 月中旬、9 月中旬、10 月中旬在距大葱根系 10~15 cm 处追施普通尿素,然后培土。其他管理措施按当地农民习惯。

小麦的氮肥分基施和追施,基肥量、追施量分别是施肥总量的 40%和 60%,追施 1 次,在 4 月上旬。基肥为撒施,然后翻地,播种。追肥采用开沟施肥,开沟后将肥料撒施到沟中,覆土 5 cm,然后浇水。其他管理措施按当地农民习惯。

大葱植株取样方法和测定指标:于 11 月中旬(收获)在每个小区的中间 2 行取 2 个 1 m 长样段,带回,洗净,晾干,称量鲜重,取一部分烘干,测定大葱氮含量^[21]。

小麦植株取样方法与测定指标:6 月中旬收获时,每个小区取 2 个 1 m²数穗数。在每个小区的中间 2 行取 2 个 1 m 双行样段,贴地面割,用于考种,测量穗粒数、千粒重、秸秆和籽粒重量,测定秸秆和籽粒氮素含量^[21]。每个小区取长势均匀的 6 m²面积进行测产。

土壤取样方法与测定指标:在 2015 年 6 月小麦收获时,取 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 的土壤,测定各层土壤硝态氮和铵态氮含量^[22]。

1.3 计算方法

养分吸收量(kg/hm²)=干物质量×养分含量;氮肥表观利用率 NAUE(%)=(施氮区植株吸氮量—不施氮区植株吸氮量)/施氮量×100%

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据处理分析,采用单因素方差分析($P<0.05$),LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 缓控释掺混尿素对大葱—小麦产量的影响

与对照(T1)相比,施氮肥处理的大葱和小麦产量均显著升高(表 2),说明该地力不能满足大葱小麦生长,需要增施氮素肥料。在施氮肥处理中,100%U(T3)处理的大葱和小麦产量均显著低于其他处理,表明一次性施用速效尿素不适合大葱和小麦生长,需要分次施用或施用缓控释肥。

与习惯施肥(T2)处理相比,2013 年大葱 50%CRU+50%U(T6)产量增加 6.29%;2014 年 100%CRU(T4)、70%CRU+30%U(T5)、T6、30%CRU+70%U(T7)处理的大葱产量均升高,增幅为 2.08%~9.16%,最高的为 T5 处理。2013 年小麦的 T5、T6 处理、2014 年小麦 T4、T5、T6 处理均升高,增幅为 2.23%~6.49%,2013 年增幅最高的为 T6,2014 年增幅最高的为 T5 处理。

与 100%CRU(T4)处理相比,2013 年大葱的 T5、T6 处理和 2014 年大葱 T5、T6、T7 处理均升高,增幅为 0.05%~20.95%,2013 年、2014 年增幅最高的分别为 T6、T5 处理。2013 年小麦的 T5、T6 处理、2014 年小麦的 T5、T6 处理均升高,增幅为 1.93%~6.65%,2013 年、2014 年增幅最高的分别为 T6、T5 处理。说明在等氮条件下,采取一次性施肥,缓控释肥的掺混比例应该≥50%。从产量结果看,在大葱和小麦上均是 2013 年 50%CRU+50%U 效果最好;2014 年 70%CRU+30%U 效果最好,其次为 50%CRU+50%U。

表 2 缓控释掺混尿素对大葱—小麦产量的影响

单位:kg/hm²

处理	大葱		小麦	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
T1	53433.71d	42310.82d	6052.08c	6983.30d
T2	69257.02ab	45352.62bc	6347.04b	7871.90b
T3	56771.09c	44435.58cd	6127.92c	7390.70c
T4	60863.52b	46294.03b	6337.32b	8047.60ab
T5	67670.71ab	49507.51a	6542.16ab	8283.50a
T6	73614.53a	47860.68ab	6759.00a	8203.20a
T7	58280.67bc	46319.01b	6240.96b	7741.40b

注:同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 缓控释掺混尿素对小麦产量形成因素的影响

与 T2 处理相比,T3 处理的有效穗数、穗粒数、千粒重均下降(表 3);2013 年有效穗数均下降,2014 年 T5、T6、T7 处理有效穗数均升高,增幅为 0.63%~1.92%;2013 年 T5、T6、T7 处理穗粒数均升高,增幅为 1.41%~4.98%,2014 年均下降;2013 年 T4、T5 处理、2014 年 T4、T5、T6、T7 处理千粒重均升高,增幅为 0.22%~2.92%;在 T4、T5、T6、T7 处理中,T5 处理的 2014 有效穗数、2014 年穗粒数、2013 年和 2014 年千粒重均最高,T6 处理的 2013 年有效穗数和 2013 年穗粒数最高,其次为 T4 处理 2014 年穗粒数、2013 年、2014 年千粒重、T5 处理的 2013 年有效穗数、2013 年穗粒数。与 T4 处理相比,T5、T6、T7 处理的有效穗数、2013 年的穗粒数均升高;T5 处理的 2014 年穗粒数、千粒重均升高。表明速效肥一次施用不适合小麦种植,缓控释尿素的掺混有利于小麦穗粒数和千粒重的增加,100%CRU 影响小麦有效分蘖,与普通尿素掺混处理后有利于小麦分蘖的形成,对于小麦产量形成因素来讲,70%CRU+30%U 效果最好,其次为 100% CRU 或 50%CRU+50%U。

表 3 缓控释掺混尿素对小麦有效穗数、穗粒数和千粒重的影响

处理	有效穗数/ (万穗·hm ⁻²)		穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)		千粒重/g	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
T1	518.82c	589.50c	36.52b	31.72c	35.42c	42.93b
T2	542.38a	632.52ab	37.42ab	34.21a	38.61ab	43.69ab
T3	527.28b	623.16b	36.48b	31.72c	36.93b	43.44ab
T4	529.38b	613.53bc	37.18ab	33.90ab	38.70ab	44.80a
T5	536.48ab	644.67a	38.91a	34.11a	39.78a	44.97a
T6	538.10ab	636.48ab	39.28a	33.80ab	38.28ab	44.71a
T7	540.67a	638.10ab	37.94ab	32.83b	36.05b	43.95ab

2.3 缓控释掺混尿素对大葱—小麦氮素吸收的影响

与 T2 处理相比,T4、T5、T6、T7 处理的大葱氮含量均升高,增幅为 2.43%~15.05%,其中增幅最大的为 T6 处理(表 4);T4、T5 处理小麦籽粒氮含量均升高,增幅为 0.66%~3.43%,增幅最大的为 T4 处理;2013 年 T4 处理、2014 年 T4、T5、T6 处理的小麦秸秆氮含量均升高,增幅为 1.94%~6.16%。

与 T4 处理相比,2013 年 T5、T6、T7 处理、2014 年 T5、T6 处理的大葱氮素含量均上升,增幅为 1.38%~12.32%;T5、T6、T7 处理小麦籽粒氮含量均下降;只有 2014 年 T6 处理小麦秸秆氮含量升高 0.62%。结果表明,在提高大葱氮含量方面,50%CRU+50%U 效果最好,其次为 70%CRU+30%U;100%CRU 促进小麦籽粒吸收氮。

与 T2 处理相比,2013 年 T5、T6 处理、2014 年 T4、T5、T6、T7 处理的大葱氮素吸收量均升高,增幅为

5.55%~22.29%,其中增幅最大的分别为 2013 年 T6 处理和 2014 年的 T5 处理(表 5);T4、T5、T6 处理小麦籽粒氮吸收量均升高,增幅为 2.97%~5.99%,2013 年、2014 年增幅最高的分别为 T6、T5 处理;T4、T6 处理小麦秸秆氮吸收量均升高,增幅为 3.66%~13.93%,增幅最大的为 T6 处理,其次为 T4 处理。

表 4 缓控释掺混尿素对大葱—小麦氮素含量的影响
单位:%

处理	大葱		麦粒		麦秸	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
T1	2.00d	1.88b	2.14ab	2.05a	0.41c	0.39c
T2	2.06d	2.09ab	2.22a	2.02a	0.75a	0.67ab
T3	2.03d	2.10ab	2.08b	2.00ab	0.66b	0.63ab
T4	2.11bc	2.17a	2.29a	2.09a	0.78a	0.71a
T5	2.26ab	2.2a	2.23a	2.03a	0.75a	0.69a
T6	2.37a	2.25a	2.21a	2.01ab	0.75a	0.71a
T7	2.35a	2.16a	2.16ab	1.86b	0.71ab	0.62ab

与 T4 处理相比,2013 年 T5、T6、T7 处理、2014 年 T5、T6 处理的大葱氮素吸收量均上升,增幅为 6.65%~35.86%;2013 年 T5、T6 处理小麦籽粒氮吸收量均升高,增幅分别为 0.77%,2.88%,2014 年 T5 增加 0.24%;只有 T6 处理小麦秸秆氮吸收量升高,2013 年、2014 年增幅分别为 5.00%,4.85%。表明综合两季大葱的氮素吸收,50%CRU+50%U 效果最好,其次为 70%CRU+30%U。100%CRU、70%CRU+30%U、50%CRU+50%U 施肥处理促进氮素向小麦籽粒转移。在小麦秸秆吸收氮方面,50%CRU+50%U 处理效果最优。

表 5 缓控释掺混尿素对大葱—小麦氮素吸收量的影响
单位:kg/hm²

处理	大葱		麦粒		麦秸	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
T1	106.87d	79.54c	129.78c	143.46c	26.55d	29.34d
T2	142.67b	94.79ab	140.82ab	158.91b	57.71ab	63.81b
T3	115.25d	93.31ab	127.67c	148.06c	45.62c	52.90c
T4	128.42c	100.46a	145.00a	168.03a	59.82a	69.33ab
T5	152.94ab	108.92a	146.11a	168.43a	56.32ab	64.93b
T6	174.47a	107.69a	149.17a	164.64a	62.81a	72.69a
T7	136.96bc	100.05a	135.05b	144.30c	53.53b	57.43c

2.4 缓控释掺混尿素对大葱—小麦氮肥表观利用率的影响

与 T2 相比,T3 处理氮肥表观利用率均降低(表 6);T4 处理 2014 大葱、2013 小麦和 2014 小麦的氮肥表观利用率均升高,增加值分别为 1.51,3.00,6.98;T5、T6 处理均能提高氮肥表观利用率,增加值为 1.86~8.48;T7 处理只有 2014 大葱氮肥表观利用

率提高 1.4 个百分点。

与 T4 处理相比,T5 处理大葱的氮肥表观利用率均升高,增加值分别为 6.54,2.26;T6 处理大葱和 2013 小麦上氮肥表观利用率均升高,增加值为 1.93~12.28;T7 处理只有 2013 大葱增加。在提高肥料表观利用率方面,大葱 50%CRU+50%U 最好,其次为 70%CRU+30%U;小麦 50%CRU+50%U 最好,其次为 100%CRU。

表 6 缓控释掺混尿素对大葱—小麦氮肥表观利用率的影响
单位: %

处理	大葱		小麦	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
T1	—	—	—	—
T2	9.55c	4.06c	20.10b	23.77b
T3	2.23e	3.67cd	8.08c	13.41c
T4	5.75d	5.58b	23.09ab	30.74a
T5	12.28b	7.83a	21.96ab	28.83a
T6	18.03a	7.50a	26.51a	30.73a
T7	8.02c	5.47b	15.36b	13.78c

2.5 缓控释掺混尿素对土壤铵态氮和硝态氮的影响

从图 1a 可以看出,同一土层不同处理间硝态氮

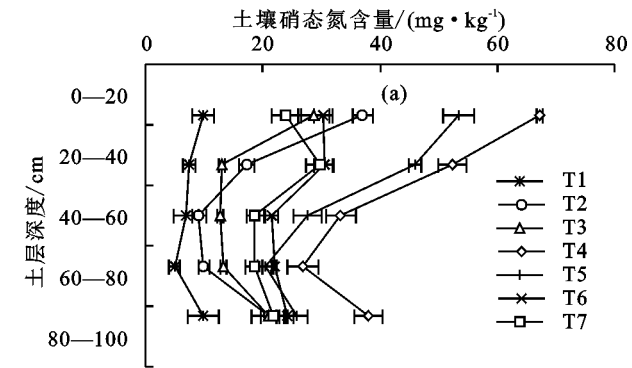


图 1 缓控释掺混尿素对土壤硝态氮、铵态氮含量在土体中垂直分布的影响

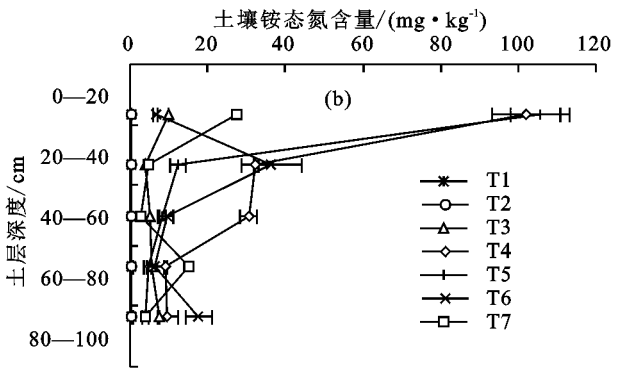
2.6 缓控释掺混尿素在大葱—小麦上的经济效益分析

与习惯施肥处理相比,大葱季,T4、T5、T6、T7 处理 2 季大葱肥料成本增加 694.82~2 316.05 元/hm²,节省肥料施用的劳务成本 2 700 元/hm²(按当时劳动力价格估算),2 季的效益相加后,T6 处理效益增加值最高,达到 10 783.93 元/hm²,效益增加 7.18%,其次为 T5 处理,T4 和 T7 处理效益降低。表明在大葱上效益最好的为 50%CRU+50%U,其次为 70%CRU+30%U(表 7)。

小麦季 T4、T5、T6、T7 处理 2 季小麦肥料成本增加 389.10~1 296.99 元/hm²,节省肥料施用的劳务成本 900 元/hm²(按当时劳动力价格估算),2 季小麦效益相加后,T6 处理效益增加值最高,达到 2 035.33 元/hm²,效益增加 6.43%,其次为 T5 处理,达到 1 448.24 元/hm²,T4 效益增加值最低,仅为 1.36 元/hm²,T7 处

相比均呈现出 T1 处理土壤硝态氮含量显著低于其他处理,表现为 T4>T5>T6>T7;0—20,20—40 cm 表现为 T2>T3;40—60,60—80,80—100 cm 表现为 T3>T2;除 0—20 cm 外,其他土层还表现出 T4、T5、T6、T7 处理显著高于 T3、T2、T1 处理的规律;0—20 cm 土层表现为 T4>T5>T2>T6>T3>T7>T1 的趋势。表明含有缓控释肥处理的土壤硝态氮在 20—100 cm 土层的累积高于纯速效肥,而且呈现出缓控释肥掺混比例越高,保留的氮量越高。而速效肥无论一次施用还是分次施用保留在 20—100 cm 土层的氮素低于含缓控释肥处理。

同一土层不同处理间铵态氮含量相比,基本呈现出 T1、T2 处理铵态氮含量显著低于其他处理,且处于未检出状态(图 1b);T4 处理均大于 T3 处理;0—60 cm T5 处理均大于 T3 处理;20—100 cm T6 处理均大于 T3 处理;0—20,60—80 cm T7 处理大于 T3 处理;20—100 cm T4 处理均大于 T5 处理;除 60—80 cm 外,其他土层 T4 处理均大于 T7 处理。缓控释肥掺混比例 50%~100%时土壤中保留的铵态氮含量高于速效肥。



理效益降低。初步表明在小麦上效益最好的为 50%CRU+50%U,其次为 70%CRU+30%U。

与 100% CRU 相比,大葱季,T5、T6、T7 处理肥料成本降低 694.82~1 621.24 元/hm²,2 季效益相加后,T6 处理效益增加最高,达到 18 965.95 元/hm²,效益增加 13.35%,其次为 T5 处理,达到 14 005.06 元/hm²,T7 效益降低(表 8)。

小麦季,T5、T6、T7 处理的肥料成本减少 389.10~907.89 元/hm²。2 季效益相加后,T6 处理效益增加最高,达到 2 033.97 元/hm²,效益增加 6.42%,其次为 T5 处理,达到 1 446.87 元/hm²,T7 处理效益降低。

3 讨论

3.1 缓控释掺混尿素配比与作物产量、氮肥利用率的关系

大量研究^[20,23-24]表明,缓控释掺混尿素一次性基施具有降低劳动投入、提高作物产量、氮素利用率等优点。

添加 40%控释氮肥稻、麦季分别比常规尿素处理增产 11%和 14%，小麦季穗长提高 19.19%，水稻季穗粒数与千粒重提高 13.79%和 8.43%^[19]，30%控释氮肥与尿素掺混施用春玉米产量较尿素一次性全施增产 9.00%^[25]。本研究表明，缓控释尿素掺混比例在 70%和 50%时，第 2,3,4 季作物产量比习惯施肥增加 3.07%~9.16%。2013 年含有缓控释尿素处理的小麦有效穗数均低于习惯施肥，2013 年、2014 年掺混处理的有效穗数均高于 100%CRU,100%CRU、70%CRU+30%U 处理的土壤

硝态氮含量高于习惯施肥，证明缓控释肥与速效肥掺混可以解决小麦生长前期土壤温度较低、单一缓控释肥养分前期释放不足的缺点，掺混的缓控释肥延长氮素供应周期，因此保证了作物前期优良生长，同时也为中后期持续供氮^[13]，籽粒充实时间延长，从而提高了籽粒产量。由于缓控释肥存在后季效应，所以不同年份表现出的规律不一致，综合 2 季大葱和 2 季小麦产量看出，产量最高的为 50%CRU+50%U，其次为 70%CRU+30%U。

表 7 2013 年和 2014 年缓控释掺混尿素处理与习惯施肥处理相比的经济效益

作物	处理	肥料成本增减/ (元·hm ⁻²)	增减产/ (kg·hm ⁻²)	增减产效益/ (元·hm ⁻²)	节约施肥用工成本/ (元·hm ⁻²)	增减的效益/ (元·hm ⁻²)	效益 增减/%
大葱	T4	2316.05	-7452.10	-8565.96	2700	-8182.01	-5.45
	T5	1621.24	2568.60	4744.28	2700	5823.04	3.88
	T6	1158.03	6865.60	9241.96	2700	10783.93	7.18
	T7	694.82	-10009.90	-11625.32	2700	-9620.14	-6.40
小麦	T4	1296.99	165.99	398.39	900	1.36	0
	T5	907.89	606.72	1456.13	900	1448.24	4.57
	T6	648.49	743.26	1783.82	900	2035.33	6.43
	T7	389.10	-236.58	-567.79	900	-56.89	-0.18

注：树脂包膜尿素价格按 2 917 元/t，普通尿素按 1 700 元/t，施肥成本按一次 450 元/hm²，大葱 3 次施肥成本，小麦 1 次。大葱价格 2013 年 1.2 元/kg，2014 年 1.6 元/kg；小麦价格均按 2.4 元/kg。下同。

表 8 2013 年和 2014 年缓控释掺混尿素处理与 100%缓控释尿素处理相比的经济效益

作物	处理	肥料成本增减/ (元·hm ⁻²)	增减产/ (kg·hm ⁻²)	增减产效益/ (元·hm ⁻²)	增减的效益/ (元·hm ⁻²)	效益 增减/%
大葱	T5	-694.82	10020.70	13310.24	14005.06	9.86
	T6	-1158.03	14317.70	17807.92	18965.95	13.35
	T7	-1621.24	-2557.80	-3059.36	-1438.12	-1.01
小麦	T5	-389.10	440.74	1057.78	1446.87	4.57
	T6	-648.49	577.28	1385.47	2033.97	6.42
	T7	-907.89	-402.56	-966.14	-58.25	-0.18

缓控释肥能促进作物吸收氮素，提高氮肥利用率已得到众多试验证实。油菜 60%CRU+40%U 比 100%U 氮肥利用率提高 7.6 个百分点^[26]；小麦应用新型水基包膜尿素 PCU60 氮肥利用率较习惯施肥提高 17.3%^[8]。本研究表明，大葱、小麦氮肥表观利用率最高的均是 50%CRU+50%U，比习惯施肥提高 3.44~8.48 个百分点；其次分别为大葱 70%CRU+30%U 增加 2.74~3.77 个百分点；小麦 100%CRU 增加 3.00~6.98 个百分点。氮肥表观利用率提高的原因是包膜尿素氮素缓慢释放，释放的氮素能被作物及时吸收，因此作物中的氮素含量较高。掺混处理的氮肥利用率高于 100%CRU 的原因是掺混处理有一部分速效氮肥作为基肥施入，为作物生长前期供应氮素，后期释放的氮素总量低于 100%CRU，所以作物收获时的籽粒和秸秆中氮素含量低于 100%CRU，但是由于掺混处理的有效分蘖多，因此产量比 100%CRU 高，最终导致掺混处理的总吸氮量高于 100%

CRU，氮肥表观利用率升高。

3.2 缓控释掺混尿素配比与土壤氮素的关系

土壤无机氮作为植物直接吸收利用的氮素形式之一，其丰缺程度可有效表征土壤供氮状况^[27]。有研究^[28]表明，控释氮肥显著降低氮素的淋失，提高耕层土壤速效氮含量。40%CRU 与 60%U 掺混一次性基施，可有效增加作物中后期土壤氮素的供应能力^[29]。本研究表明，含有缓控释肥处理的土壤硝态氮在 20—100 cm 土层的累积高于纯速效肥，而且呈现缓控释肥掺混比例越高，保留的氮素量越高。原因可能主要是缓控释肥氮素缓慢释放，经过四季作物种植后，累积的养分增多。而速效肥无论一次施用还是分次施用保留在 20—100 cm 土层的氮素低于含控释肥处理。本研究中 0—20 cm 中 100%CRU 和 70%CRU+30%U 的含量高于习惯施肥，50%CRU+50%U、30%CRU+70%U 低于习惯施肥，说明速效氮肥含量高于 50%后，一次性施用保留在耕层土中的有

效氮素低于分次施用。在保留土壤氮素方面,缓控释肥掺混比例越高越好,应该进一步检测 100 cm 以下土层的氮素含量,以明确流失的比例。本研究中,掺混缓控释肥比例 50%~100%时土壤中保留的铵态氮含量高于速效肥,而且铵态氮含量明显低于硝态氮含量,这主要是由于旱地土壤的硝化作用有利于土壤铵态氮向硝态氮的转化补充,这与大多数研究^[30-31]一致。

3.3 经济效益与最佳掺混尿素配比

缓控释肥价格相对偏高,农民难以接受,所以至今难以大面积应用到大田。目前生产缓控释肥的主要工艺是包膜,常用的材料为树脂、硫磺、水基等,树脂包膜肥料的市场价大约为 2 917 元/t,如果掺混一定的尿素(1 700 元/t),可以降低价格。在本试验中,大葱施氮量是 375 kg/hm²,若全部采用树脂包膜尿素,则肥料投入成本为 2 544 元/hm²,全部施用普通尿素为 1 386 元/hm²,两者相差约 1 158 元/hm²。小麦施氮量 210 kg/hm²,若全部采用树脂包膜尿素,则肥料投入成本为 1 425 元/hm²,全部施用普通尿素为 776 元/hm²,两者相差约 649 元/hm²。树脂包膜尿素与普通尿素掺混后,肥料成本介于两者之间,加上节省的施肥人工及增产带来的效益,50%CRU+50%U 的效益最高,四季作物的效益比 100%CRU 增加 20 999.91 元/hm²,比习惯施肥增加 12 819.26 元/hm²;其次为 70%CRU+30%U,比 100%CRU 增加 15 451.93 元/hm²,比习惯施肥增加 7 271.28 元/hm²。这些结果与大多数学者^[15]研究一致,小麦季 80%CRF 较农民习惯增收 1 373.8 元/hm²,玉米季增收 1 357.9 元/hm²;40%控释氮肥与 60%尿素掺混一次性基施较常规尿素处理,小麦季增收 1 108.12 元/hm²,水稻季增收 2 497.80 元/hm^{2[32]},证明缓控释尿素与普通尿素掺混比例合适,则能降低肥料成本,增加经济效益。

4 结论

在山东章丘大葱—小麦上可以施用缓控释掺混肥,实现一次性施肥,缓控释尿素与普通尿素的最佳配比为 50%CRU+50%U,其次为 70%CRU+30%U。50%CRU+50%U 和 70%CRU+30%U 处理的两季大葱、小麦总产量分别比习惯施肥处理提高 2.2%~6.0% 和 4.3%~5.2%;氮肥表观利用率分别提高 2.74~8.48,1.86~6.96 个百分点;四季作物的总经济效益提高 7 271.28~12 819.26 元/hm²;0—20 cm 土层 100%CRU、70%CRU+30%U 处理土壤硝态氮含量高于习惯施肥,20—100 cm 土层含有缓控释肥处理的土壤硝态氮的累积高于习惯施肥,而且呈现出缓控释肥掺混比例越高,保留的氮素量越高。

参考文献:

- [1] 张德纯.山东章丘大葱[J].中国蔬菜,2018(8):43.
- [2] 田晓庆,于法常,王瑞,等.章丘大葱成分及其作用分析[J].中国果菜,2016,36(11):17-20.
- [3] 中国农业统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2004.
- [4] 郑文魁,李成亮,窦兴霞,等.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.
- [5] 李前,秦裕波,孔丽丽,等.不同类型的缓/控释肥对玉米氮素吸收及土壤速效氮的影响[J].玉米科学,2017,25(4):123-128.
- [6] 王晓琪,朱家辉,陈宝成,等.控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):178-182.
- [7] 韩蔚娟,王寅,陈海潇,等.黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J].水土保持学报,2016,30(2):307-311.
- [8] Francoa C M M, Michelsena P P, Oadesb J M. Amelioration of water repellency: Application of slow-release fertilisers to stimulate microbial breakdown of waxes [J].Journal of Hydrology,2000,231/232:342-351.
- [9] Al-Zahrani S M. Controlled-release of fertilizers: Modelling and simulation[J].International Journal of Engineering Science,1999,37:1299-1307.
- [10] Fernández-Escobar R, Benlloch M, Herrera E, et al. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching [J].Scientia Horticulturae,2004,101:39-49.
- [11] 刘永哲,陈长青,尚健,等.沙壤土包膜尿素释放期与小麦适宜施用方式研究[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):905-912.
- [12] 何杰,李冰,王昌全,等.不同施氮处理对水稻油菜轮作土壤氮素供应与作物产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(15):2957-2968.
- [13] 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.
- [14] 谭德水,江丽华,房灵涛,等.控释氮肥一次施用对小麦群体调控及养分利用的影响[J].麦类作物学报,2016,36(11):1523-1531.
- [15] 张婧,李虎,朱国梁,等.缓控释肥施用对土壤 N₂O 排放的影响:以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J].生态学报,2017,37(22):1-12.
- [16] 谷佳林,曹兵,李亚星,等.缓控释氮素肥料的研究现状与展望[J].土壤通报,2008,39(2):431-434.
- [17] 万连步,杨力,张民.作物营养与施肥丛书·综合卷—小麦[M].济南:山东科学技术出版社,2004:30-31.
- [18] 黄巧义,唐拴虎,张发宝,等.减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):829-838.

- [19] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释掺混氮肥对稻麦作物生长和产量的影响[J].浙江农业学报,2016,28(8):1287-1296.
- [20] 李伟,李絮花,董静,等.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.
- [21] 李酉开.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1989.
- [22] 焦如珍,董玉红,孙启武.LY/T 1228-2015 森林土壤氮的测定[S].北京:国家林业局,2015:1-16.
- [23] Guo J, Wang Y, Blaylock A D. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15\text{ Mg/hm}^2$) maize[J].Field Crops Research,2017,204:23-30.
- [24] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].土壤通报,2015,46(3):669-675.
- [25] 王寅,冯国忠,张天山,等.基于产量氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例[J].土壤学报,2015,52(5):1153-1164.
- [26] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.控释尿素与尿素配施对油菜籽产量、经济效益和土壤无机氮含量的影响[J].中国油料作物学报,2013,35(3):295-300.
- [27] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J].中国农业科学,2012,45(9):1741-1749.
- [28] 刘飞,张民,诸葛玉平,等.马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1351-1358.
- [29] 张敬昇,李冰,王昌全,等.控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):110-118.
- [30] 胡晓航,周建朝,王秋红,等.温度、水分和施肥对甜菜黑土氮素迁移转化的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):82-88.
- [31] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1449-1456.
- [32] 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.
- (上接第 129 页)
- [13] 谢炎敏.WEPP 与 RUSLE 在南方红壤丘陵区土壤侵蚀模拟中的应用对比研究[J].人民珠江,2018,39(10):34-38.
- [14] 朱韵峤.WEPP 模型在紫色土区域适用性研究[J].安徽农业科学,2017,45(23):106-108,113.
- [15] 叶俊道,秦富仓,岳永杰,等.WEPP 模型在砒砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):132-135.
- [16] 常平.冲蚀条件下砒砂岩坡面水力侵蚀特性试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [17] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社,2017.
- [18] Foster G R, Lane L J. User requirements, USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)[R].NSERL Report No.1, West Lafayette: USDA—ARS National Soil Erosion laboratory,1987.
- [19] 张晴雯,雷廷武,姚春梅,等.WEPP 细沟剥蚀率模型正确性的理论分析与实验验证机[J].农业工程学报,2004,20(1):35-39.
- [20] 余长洪,李就好,陈凯,等.砖红壤区 WEPP 模型土壤参数的率定[J].广东农业科学,2013,40(4):177-178,186.
- [21] 董荣万,朱兴平,何增化,等.定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究[J].水土保持通报,1998,18(3):1-9.
- [22] 刘远利,郑粉莉,王彬,等.WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价:以坡度和水保措施为例[J].水土保持通报,2010,30(1):139-145.
- [23] 王怀智.沙棘的生物学特征及生态作用[J].现代农业科技,2011(16):193-194.
- [24] 刘胜,贺康宁,王正宁,等.青海大通地区退耕地人工林分的消光特性[J].中国水土保持科学,2006,4(3):59-64.
- [25] 尹婧,邱国玉,何凡,等.半干旱黄土丘陵区人工林叶面积特征[J].植物生态学报,2008,32(2):440-447.
- [26] 王浩,黄晨璐,杨方社,等.砒砂岩区沙棘根系的生境适应性[J].应用生态学报,2019,30(1):157-164.
- [27] 刘广全,土小宁,王鸿哲,等.沙棘苗木根系生长发育特征研究[J].西北林学院学报,2005(3):26-30,52.
- [28] 云锦凤,米福贵.干旱地区一种优良禾草:蒙古冰草[J].内蒙古草业,1990(2):70-71,25.
- [29] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [30] 秦隆宇.基于不同水土保持措施下径流小区降雨与产流产沙关系研究[J].黑龙江水利科技,2018,46(11):51-54.
- [31] Liu Z, Notaro M, Gallimore R. Indirect vegetation-soil moisture feedback with application to Holocene North Africa climate[J].Global Change Biology,2010,16:1733-1743.