

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

张敬昇¹, 李冰¹, 王昌全¹, 尹斌², 向毫¹, 付月君¹, 谢一平¹

(1. 四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 开展田间小区试验, 研究了控释氮肥与尿素掺混施用对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响, 旨在寻求控释氮肥与尿素最佳掺混比例, 提出缓解氮肥损失、降低面源污染、节约成本、易于推广的施肥方式。结果表明: 较常规尿素处理, 控释氮肥与尿素掺混对土壤铵态氮含量影响总体差异不显著; 在小麦分蘖期, 常规尿素处理土壤硝态氮含量和土壤脲酶活性较高, 而小麦拔节期至成熟期, 则以掺混 40% 比例以上控释氮肥处理的土壤硝态氮含量和脲酶活性较高; 各施氮处理对小麦穗粒数和千粒重影响差异不显著, 产量以掺混 40% 控释氮肥处理最高, 较常规尿素处理增产 14%, 因产值最高, 投入成本适中, 净收入水平和产投比均为最高, 分别为 5 875.72 元·hm⁻² 和 2.24, 较常规尿素处理提高了 23.24% 和 9.27%。综上, 40% 控释氮肥与 60% 尿素掺混处理在提高土壤无机氮含量, 激活小麦生长中、后期脲酶活性, 增加冬小麦产量方面效果显著。

关键词: 冬小麦; 掺混氮肥; 无机氮; 脲酶; 产量

中图分类号: S143.1; S512.1 **文献标志码:** A

Effects of bulk blend fertilizers with different controlled nitrogen ratios on the soil inorganic nitrogen, urease and winter wheat yield

ZHANG Jing-sheng¹, LI Bing¹, WANG Chang-quan¹, YIN Bin²,

XIANG Hao¹, FU Yue-jun¹, XIE Yi-ping¹

(1. College of Resources, Sichuan Agriculture University, Chengdu, Sichuan 611130, China;

2. Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: To reveal the effect of different application of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on the soil inorganic nitrogen, urease and winter wheat yield, we carried out the field experiment aimed at studying the optimum combination of controlled release nitrogen fertilizer and conventional urea and thereby putting forward proposal for reducing nitrogen fertilizer loss and non-point source pollution, and saving cost as well. The results showed that compared with urea, combination application of controlled release nitrogen fertilizer and urea treatment had less influence on soil NH₄⁺ - N contents. At wheat tillering stage, urea treated soil NO₃⁻ - N contents and urease were more active. By contrast, soil NO₃⁻ - N contents and urease activity were higher by combination of urea and 40% controlled release nitrogen fertilizer at the later growth stage. Nitrogen fertilizer treatments had a little influence on the grain number per panicle and the 1000-weight of wheat. While 60% urea blended with 40% controlled release nitrogen fertilizer (40% CRU) increased grain yield significantly, as high as 14% compared with urea treatment. As the output value was the highest, input cost was moderate, the net income level and output/input ratio were the highest, respectively, 5 875.72 yuan·hm⁻² and 2.24, compared with the urea treatment increased by 23.24% and 9.27%. In conclusion, the combined application of 40% controlled release nitrogen fertilizer with 60% conventional urea was the optimum ratio with the beneficial effect of improving soil inorganic nitrogen contents, activating the urease activity during the later growth stage of wheat, and increasing the yield of winter wheat.

Keywords: winter wheat; bulk blending nitrogen fertilizer; inorganic nitrogen; urea; yield

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAD07B13), 四川省科技支撑计划(2012JZ0003, 2013NZ0028)

作者简介: 张敬昇(1993—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮素转换。E-mail: jove20883452@163.com。

通信作者: 王昌全(1961—), 男, 教授, 主要研究方向为土壤质量与农产品安全。E-mail: w.changquan@163.com

控释氮肥作为绿色高效肥料的重要发展方向,较普通尿素更能满足作物对氮素的需求,有效促进作物生长发育^[1-5]。土壤无机氮是作物吸收的主要氮源,合理的氮肥运筹能显著提高土壤供氮水平并促进作物生长发育^[6]。脲酶能催化土壤氮转换与代谢,促进潜在氮素有效化^[7],其活性高低可表征土壤供氮水平^[8]。单施控释氮肥的氮素释放特征,通常可提高作物生长中、后期土壤无机氮含量^[9-10],激活土壤脲酶活性,促进含氮氧化物的有效化^[11],延长土壤持续供氮能力,增强作物在关键生长时期的氮素吸收,进而促进光合作用和氮素累积与代谢,达到提高作物产量和氮素利用率水平^[12-14]。但控释氮肥较尿素的价格高出 2.5~8 倍,故常施用于附加值较高的花草蔬果^[15-16]。而冬小麦等麦类作物,单一施用控释氮肥料的成本偏高,农民普遍不易接受,因此在大面积推广使用上相对受限^[17-18]。同时,控释氮肥肥效周期普遍较长,可能造成作物在生育前期缺乏速效氮素,生育晚期贪青晚熟或作物倒伏^[19],故提出尿素与控释氮肥掺混的新施肥方式。前人在单施控释氮肥对作物产量和氮素利用率上有较多研究,但就尿素与控释氮肥掺混对土壤供氮特征以及作物产量高低的研究较少。本文通过田间小区试验,设置不同掺混控氮比,研究控释氮肥与尿素不同掺混比例对冬小麦各生育期土壤无机氮含量和脲酶活性的动态变化、产量及经济效益等影响,分析并探讨不同控释氮肥比例特征和差异,旨在寻求最佳控释氮肥与尿素掺混比例,为小麦生产的氮肥合理高效施用技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2014 年 11 月至 2015 年 5 月在四川农业大学崇州市桤泉镇试验基地进行,该区域年均气温 15.9℃,年均日照时数 1 161.5 h,年均降雨量 1 012.4 mm,年均无霜期 285 d。供试土壤类型为水稻土,土壤有机质 29.57 g·kg⁻¹,全氮含量 1.44 g·kg⁻¹,碱解氮 60.76 mg·kg⁻¹,速效磷 13.82 mg·kg⁻¹,速效钾 110.60 mg·kg⁻¹,pH 值 6.43。

1.2 供试材料

控释氮肥含氮(N 41.4%),氮素释放周期约为 90 d,由中国科学院南京土壤研究所研制;尿素(N 46.4%),由四川美丰化工有限公司生产;过磷酸钙(P₂O₅ 12%),由湖北祥云化工股份有限公司生产;氯化钾(K₂O 60%),由湖北宜昌涌金工贸有限公司经销。供试小麦品种为内麦 836。

1.3 试验设计

试验共设 7 个处理:CK(不施氮肥);U(常规施氮 100% 尿素);10% CRU(控释氮肥 10% + 普通尿素 90%);20% CRU(控释氮肥 20% + 普通尿素 80%);40% CRU(控释氮肥 40% + 普通尿素 60%);80% CRU(控释氮肥 80% + 普通尿素 20%);CRU(控释氮肥 100%)。除 CK 不施氮处理外,各处理氮、磷、钾用量一致,施氮量为 150 kg·hm⁻²,施磷量 90 kg·hm⁻²,施钾量 90 kg·hm⁻²,肥料均作为基肥一次性基施。

试验小区长 5 m,宽 6 m,小区面积 30 m²。随机排列,每个处理设三次重复。

1.4 样品采集

土样分别于小麦播种前采集基础土样分析其理化性质,在小麦生长分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期用土钻于各小区采集 0~20 cm 与 20~40 cm 两个土层土样,土样以多点混合法采集。采集土样分为两个部分,一部分为鲜样用于脲酶活性及含水率测定,另一部分风干后磨细过筛测定土壤养分含量。

植物样采于小麦成熟期,产量单打单收,计产。

1.5 样品测定

土壤铵态氮采用靛酚蓝比色法,硝态氮采用紫外双波段比色法^[20]。土壤脲酶采用苯酚钠比色法^[21]。

小麦于成熟期采集后,进行烘干,单独脱粒,产量以风干后的重量表示。

1.6 数据处理

采用 Excel 软件和 SPSS 软件对试验数据处理分析,数据采用 LSD 方法进行统计处理($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对冬小麦农田土壤铵态氮的影响

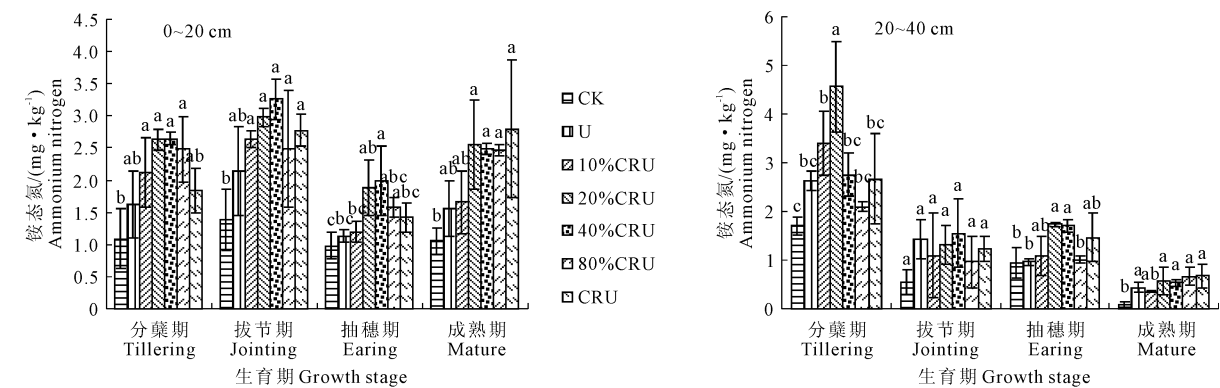
由图 1 可看出,各生育期不同处理的铵态氮含量均较低,总体差异不显著。在小麦生殖生长关键时期(拔节期~抽穗期),40% CRU 处理在 0~20 cm 土壤中铵态氮含量相对较大,尤其在抽穗期时,与 U 处理差异显著。20~40 cm 土壤铵态氮随生育期推进呈下降趋势,添加 20% 以上控释氮肥处理在生育中后期均能有效维持较高水平,40% CRU 处理在分蘖~抽穗期,其铵态氮水平最高。说明 40% CRU 处理能有效提高土壤铵态氮含量。

2.2 不同处理对冬小麦农田土壤硝态氮的影响

小麦季硝态氮含量呈先增长后下降趋势(图 2)。与 CK 相比,氮肥的施用能显著提高土壤硝态氮含量。在分蘖期,常规施肥处理土壤硝态氮含量最高,在 0~20 cm 土层中,与其余各处理差异显著;

在 20 ~ 40 cm 土层中,也与 40% CRU、80% CRU 和 CRU 处理差异显著。小麦自拔节期进入需氮水平较高时期,该时期不同土层中,CRU 处理土壤硝态氮含量均最高,与其余各处理差异显著,80% CRU 与 40% CRU 处理硝态氮含量也较高,均与常规施肥差异显著。抽穗期起,吸收与积累的养分元素向穗部运输,小麦发育仍对氮素具有较高需求,在不同土层中,40% CRU 与 80% CRU 处理的硝态氮水平相对较

高,均与 U 和 10% CRU 处理达显著差异。成熟期小麦发育完全,对氮素需求减少,0 ~ 20 cm 土层中,各施氮处理硝态氮含量随缓控氮肥比例增加而增加,即 CRU > 80% CRU > 40% CRU > 20% CRU > 10% CRU > U > CK,且 80% CRU、CRU 处理与其余各氮肥处理差异显著,在 20 ~ 40 cm 土层中,40% CRU 与 80% CRU 处理硝态氮含量最高和次高,均与 U 处理达显著差异水平。



注:柱图上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters on the top of the column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同处理对冬小麦不同生育期土壤铵态氮含量的影响

Fig. 1 Influence of different treatments on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content in soil at different growth stages of winter wheat

总体来看,在冬小麦生育前期,各土层中,U 处理土壤硝态氮含量最大;在小麦生育中、后期,40% CRU、80% CRU 和 CRU 处理土壤硝态氮含量均较

高;说明了控释氮肥添加比例超过 40% 处理对小麦生育中、后期土壤耕作层硝态氮含量具有显著提升效果,满足小麦生长发育关键时期对氮素的吸收。

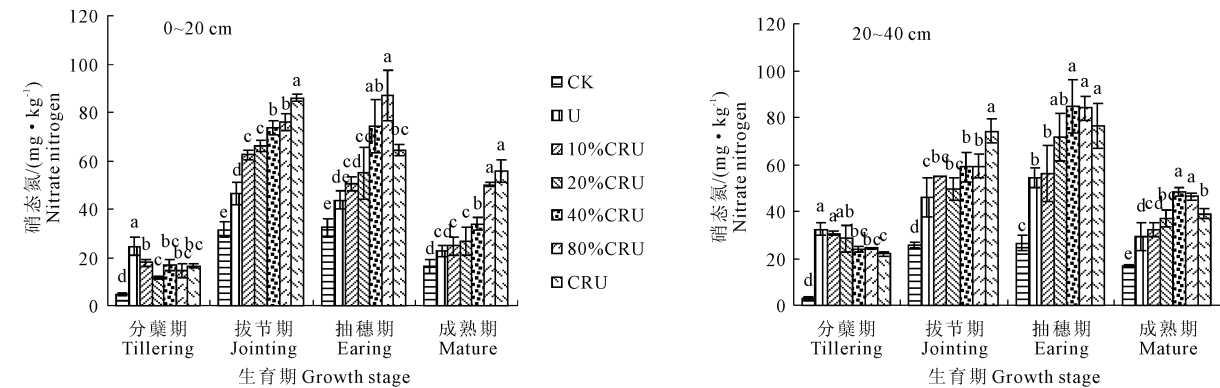


图 2 不同处理对冬小麦不同生育期土壤硝态氮含量的影响

Fig. 2 Influence of different treatments on $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content in soil at different growth stages of winter wheat

2.3 不同处理对冬小麦农田土壤脲酶活性的影响

小麦季脲酶总体呈先增长后下降的趋势,且拔节期出现脲酶活性峰值(图 3)。与 CK 比较,氮肥施用能显著提高土壤脲酶活性。分蘖期时,各土层 U 处理土壤脲酶活性最大,且在 0 ~ 20 cm 土层中,与其余各处理差异显著。拔节期时,在 0 ~ 20 cm 土层中,40% CRU 处理脲酶活性最大,与 U、10% CRU 和

20% CRU 处理差异显著;拔节期时,在 20 ~ 40 cm 土层中,CRU 处理脲酶活性最大,与除 80% CRU 处理外的各处理差异显著,80% CRU 脲酶活性次之,与 U、10% CRU 和 20% CRU 处理差异显著,40% CRU 和 20% CRU 处理脲酶活性也相对较大,与 U 和 10% CRU 处理差异显著。抽穗期至成熟期,各土层中 40% CRU、80% CRU 和 CRU 处理下的脲酶活性均较大,且均与 U 处理差异显著。

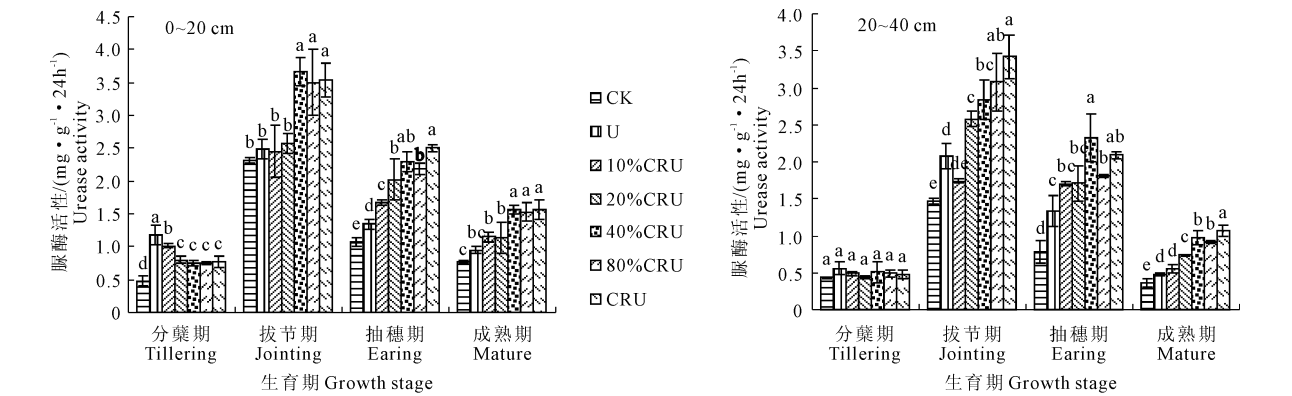


图 3 不同处理对冬小麦不同生育期土壤脲酶活性的影响
Fig.3 Influence of different treatments on soil urease activity

总体上看,在小麦分蘖期,U 处理提高了土壤脲酶活性,促进了氮素的转换,提高了土壤无机氮含量(图 1,图 2)。自小麦进入拔节起,控释氮肥添加比例超过 40% 处理均能有效激活土壤脲酶活性,促进土壤有效氮含量,有利于小麦生殖生长阶段的氮素吸收和积累。

2.4 不同处理对冬小麦产量及经济效益的影响

由表 1 可看出,在小麦产量方面,随掺混控释氮肥比例增大,产量呈先上升后下降趋势,产量最高为 40%CRU 处理(40%控释氮肥 + 60% 尿素),较 U 处理增产率达 14%,较 CRU 处理增产率达 7%,与各处理差异显著。在穗粒数方面,空白处理与其余各

处理差异显著,表明氮肥施用能提高小麦产量构成因子;但氮肥处理对小麦千粒重的影响较小,各处理差异不显著。经济效益方面,成本投入随控氮比增加而增加,净收入则先增长后下降,40%CRU 处理为净收入最大值,较 U 处理增收 1 108.12 元·hm⁻²,提高了 23.24%;较 CRU 处理增收 1 053.79 元·hm⁻²,提高了 21.85%。产投比仍以 40%CRU 处理最高,比 U 处理增长了 9.27%,比 CRU 处理增长了 14.87%。故表明 40%CRU 处理能显著提高小麦产量和经济效益,而 U 和 CRU 处理产量与经济效益水平均较低。

表 1 不同处理对冬小麦产量及经济效益的影响

Table 1 Influence of different treatments on winter wheat yield and economic benefit

处理 Treatments	穗粒数 Grain number per panicle	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	产值 Output value /(元·hm ⁻²)	投入 Input value /(元·hm ⁻²)	净收入 Net profit /(元·hm ⁻²)	产投比 Output/input ratio
CK	11.67 ± 1.16b	35.82 ± 2.45a	2 339.33 ± 59.13d	4444.73	3812.50	632.23	1.17
U	38.00 ± 2.00a	40.30 ± 1.33a	4 898.67 ± 88.31c	9307.47	4539.87	4767.60	2.05
10%CRU	38.33 ± 5.69a	40.20 ± 2.44a	4 670.80 ± 260.00c	8874.52	4593.95	4280.57	1.93
20%CRU	37.67 ± 3.51a	39.82 ± 3.03a	5 375.47 ± 102.88ab	10213.39	4648.02	5565.37	2.20
40%CRU	34.00 ± 3.00a	41.07 ± 1.79a	5 595.73 ± 184.84a	10631.89	4756.17	5875.72	2.24
80%CRU	39.00 ± 7.00a	40.00 ± 2.08a	5 325.73 ± 122.38ab	10118.89	4972.47	5146.42	2.03
CRU	41.00 ± 8.00a	39.72 ± 0.60a	5 211.87 ± 121.60b	9902.55	5080.62	4821.93	1.95

注:尿素市售 2.25 元·kg⁻¹;控释氮肥 3.5 元·kg⁻¹;磷肥 1.0 元·kg⁻¹;钾肥 3.75 元·kg⁻¹;劳务费 100 元·人⁻¹·天⁻¹;面粉 1.9 元·kg⁻¹。同列不同字母表示不同处理间差异显著(P < 0.05)。

Note: Urea 2.25 yuan·kg⁻¹; controlled nitrogen fertilizer 3.5 yuan·kg⁻¹; phosphate fertilizer 1.0 yuan·kg⁻¹; potassium fertilizer 3.75 yuan·kg⁻¹; Labor cost 100 yuan·person⁻¹·day⁻¹; flour 1.9 yuan·kg⁻¹. Letters in column indicate significant differences at P < 0.05 level.

3 讨 论

旱作条件下,NH₄⁺ - N 受土壤颗粒负电荷吸附及硝化作用影响,其含量较少,浓度基本随土层加深而变小^[22]。熊淑萍等^[23]研究表明,小麦同一生育

时期不同施氮处理在 1.2 m 土体内铵态氮分布均匀,全生育期铵态氮含量差异不显著,与本试验结果的趋势基本一致。本研究表明,总体上冬小麦 0 ~ 20 cm 土壤铵态氮表现为先上升后下降,拔节期出现峰值;20 ~ 40 cm 土壤呈逐渐下降趋势。全生育

期,控释氮肥与尿素掺混配施的各处理土壤铵态氮含量均较小,即铵态氮水平相对稳定。这可能因为控释氮肥氮素释放周期长,铵离子较为均匀分布于土体,更易于土壤胶体吸附以及固定态铵形成,旱作条件下,随氧化还原电位上升,产生持续较为强烈的硝化作用,进一步抑制了铵态氮水平和迁移动态,但40%CRU处理的土壤铵态氮水平相对较好。

在干旱及半干旱的地区,土壤中氮主要以 NO_3^- -N形式存在,硝态氮含量受地上作物类型差异及时间推移的影响而变化^[24-25]。硝态氮是作物吸收氮源的主要形态之一,但极易受径流和淋溶流失^[26],影响作物吸收,造成环境威胁。衣文平等^[27]研究表明,控释氮肥可显著提高土壤耕作层硝态氮水平,促进作物产量和氮肥利用率显著提高。郑沛等^[10]研究发现,硫膜与树脂膜控释氮肥能有效调节小麦拔节~孕穗期的氮素形态及有效性,减少硝态氮的迁移流失量,协调供应全生育期的养分需求。本试验结果表明,U处理在小麦生育前期土壤硝态氮含量高,中后期则相对减少,与作物的生长速率和氮素吸收速率不一致,易造成后期脱肥,导致无效分蘖数量增多,氮肥利用率较低,生物量积累受到抑制。同时土壤表层硝酸盐残留率的增加,会增加随水体下渗造成的环境威胁。控释氮肥添加比例超过40%处理对硝态氮含量的施用效果均较佳,因其恰当的掺混比例能协调各生育期养分需求,显著提高全生育期硝态氮水平,增加小麦前期有效分蘖,满足因干物质积累和器官发育的氮素需求。此外,各添加控释氮肥处理深层土壤总体波动较小,其含量水平适中,反映了配施控释氮肥能抑制硝态氮淋溶,减少硝酸根迁移,降低水体污染风险,保障表层耕作土壤持有充足的氮素养分。

土壤酶的活性是土壤肥力的关键指标之一,反映了土壤中相关生物化学动态变化及强度^[28-29]。适量的无机肥施用能一定程度激活土壤酶,促进土壤养分循环与转换^[30]。而尿素仅在脲酶活动下进行水解,其酶促产物是植物可利用的主要氮源之一,故脲酶活性高低可用来表征土壤氮素丰缺^[31]。张俊丽等^[32]研究证明,与尿素相比,控释氮肥能显著提高土壤脲酶并有效减少碳排放量。刘明等^[33]研究还发现,控释氮肥的树脂残膜通过改善土壤结构和环境,土壤脲酶活性提高了17.39%~85.71%,有效增加土壤微生物数量,并刺激植物根系生长。本试验结果表明,U处理土壤脲酶活性在小麦生育前期相对较高,这是因为尿素释放与扩散速度迅速,铵根离子与硝酸根离子浓度增加导致微域环境变化,

短期较为充足的底物刺激了酶促活动,而尿素保肥能力差,提供于小麦生育中、后期土壤的底物较少,故拔节~成熟期脲酶活性较差。控释氮肥添加比例超过40%的处理在整个小麦生育期间,通过氮素释放速率的有效控制,提供了以硝态氮为主的酶促底物,从而在小麦生育中、后期仍表现出较高的脲酶活性,进而可能通过影响直接参与土壤氮素转换的微生物数量,增强土壤氮素形态转换和有效性,以达到对冬小麦各营养器官可吸收养分的协调,对冬小麦自抽穗期起的穗部发育有重要贡献。

籽粒生物量随光合产物积累形成,作物茎鞘不断吸收积累的物质在抽穗期开始逐渐向穗部籽粒转移,高质增产的重要途径是生育中、后期干物质的有效积累^[34]。控释氮肥与尿素掺混配施,通过两种肥料不同的氮素释放速率,优势互补,缓急并重,供肥平衡^[35]。有研究表明,控释掺混肥既有利于作物生长前期发育,更能在成熟期显著提高产量和氮素利用率,增加经济效益^[36-37]。本试验表明,氮肥施用能够提高作物产量及产量构成因子。U处理因在小麦生育前期释放速率迅速,氮素利用率低,而在小麦生育中、后期的持续供氮能力弱,从而抑制了作物发育,产量相对较低。掺混配施40%控释氮肥+60%尿素处理(40%CRU)能在小麦全生育期持续提供充足氮素养分,尤其在小麦生育中、后期,仍可维持较高的无机氮含量,既克服了单施尿素造成的后期脱氮缺肥,又可弥补CRU处理可能引起的前期供氮不足、或后期贪青晚熟的现象,有助于小麦干物质积累和较佳的谷草比水平实现,达到显著增产效果。此外,40%CRU处理因恰当的掺混比例,有效降低了施用控释氮肥的成本,其成本投入合理适中,经济效益方面净收入最高,有效增加了农民的纯利润,较高的产投比更有助于农民接受并推广控释氮肥的施用。

4 结 论

本研究表明,在掺混配施40%控释氮肥+60%尿素处理(40%CRU)条件下,土壤铵态氮含量在小麦整个生育期相对较高,增强了土壤硝化作用的潜力;其土壤硝态氮含量和脲酶活性在小麦各生育期处于高水平,有利于小麦对氮素营养的吸收利用,促进各营养器官干物质积累和养分协调,最终达到小麦产量与经济效益显著提高。较常规尿素处理,40%CRU处理小麦产量达 $5\,595.73\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增产14%,经济效益净收入增收 $1\,108.12\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,提高了23.24%。因此,推荐掺混配施控释氮肥40%+尿素60%处理为提高土壤氮素供应、促进土壤脲酶活

性、增加小麦产量及经济效益的最佳掺混比例。

参 考 文 献:

[1] 祝丽香,毕建杰,王建华,等.控释尿素与尿素配施对抗白菊产量和氮肥利用率的影响[J].园艺学报,2013,40(4):782-790.

[2] 邱现奎,董元杰,万勇善,等.不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J].土壤,2010,42(2):249-255.

[3] Trenkel M E. Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture[M]. Pairs: International Fertilizer Industry Association, 1997, 10.

[4] Meister S S. Controlled release fertilizers 2 Properties and Utilization [M]. Sendai; Konno Printing Co Ltd, 1999,59-104.

[5] Ni X Y, Wu Y J, Wu Z Y, et al. A novel slow - release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism[J]. Biosystems Engineering, 2013,115:274-282.

[6] 唐文雪,马忠明,王景才.施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):58-63.

[7] 赵 鹏,陈 阜,李 莉.秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J].华北农学报,2010,25(3):165-169.

[8] 任天志.持续农业中的土壤生物指标研究[J].中国农业科学,2000,33(1):68-75.

[9] Gao X, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanumtuberosum* L.) on silt loamy soil[J]. Field Crops Research, 2015,181:60-68.

[10] 郑 沛,宋付朋,马富亮.硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J].水土保持学报,2014,28(4):122-127.

[11] 朱洪霞.缓/控释复合肥料对土壤氮素和酶活性的影响[D].重庆:西南大学,2007.

[12] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yieldsand soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. Field Crops Research, 2015,184:65-73.

[13] 王君杰,曹晓宁,陈 凌,等.不同氮肥处理对糜子产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):30-33,51.

[14] 李 敏,李广涛,叶舒娅,等.连续施用控释氮肥对超级水稻产量、氮肥利用率及土壤养分变化的影响[J].中国农学通报,2012,28(33):130-134.

[15] Alva A K, Paramasivam S, Obreza T A, et al. Nitrogen best management practice for citrus treesI. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status[J]. Scientia Horticulturae, 2006,107:233-244.

[16] 魏建林,崔荣宗,张玉凤,等.不同用量控释氮肥在葡萄生产上的施用效果[J].北方园艺,2012,(20):156-158.

[17] 祝丽香,王建华,高先涛.控释尿素与普通尿素配施对菊花生理指标及产量和质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):483-490.

[18] 于淑芳,杨 力,张 民,等.控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1744-1749.

[19] 孙 磊.控释氮肥在水稻上的应用效果研究[J].作物杂志,2009,(2):76-78.

[20] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012:60-64.

[21] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986:297-298.

[22] 李 伟,李絮花,唐慎欣,等.控释掺混肥对夏玉米产量及土壤硝态氮和铵态氮分布的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):68-71,91.

[23] 熊淑萍,姬兴杰,李春明,等.不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(3):978-983.

[24] 薛晓辉,郝明德.旱作地区长期小麦连作和苜蓿连作土壤剖面的矿质氮研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):620-625.

[25] 赵 维,蔡祖聪.基于变化阶段特点的亚热带红壤硝化模式及其影响因素分析[J].生态环境学报,2011,20(10):1387-1394.

[26] 谭德水,江丽华,张 莺,等.不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究—以南四湖过水区粮田为例[J].生态学报,2011,31(12):3488-3496.

[27] 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.

[28] 焦晓光,隋跃宇,魏 丹.长期施肥对薄层黑土酶活性及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2011,(1):6-9.

[29] 陈文婷,付岩梅,隋跃宇,等.长期施肥对不同有机质含量农田黑土土壤酶活性及土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2013,29(15):78-83.

[30] 叶家颖,杨爱平,秦连发,等.科学施肥对月柿产量及土壤酶活性效应的研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2003,21(3):87-90.

[31] 刘淑英.不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J].水土保持学报,2010,24(1):219-223.

[32] 张俊丽,高明博,温晓霞,等.不同施肥措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO₂ 排放量的影响[J].生态学报,2012,32(19):6147-6154.

[33] 刘 明,张 民,杨越超,等.控释肥残膜对小麦各生育期土壤微生物和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):1012-1017.

[34] 卢海博,龚学臣,乔永明,等.张杂谷干物质积累及光合特性的研究[J].作物杂志,2014,(1):121-124.

[35] 李 伟,李絮花,李海燕,等.控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J].作物学报,2012,38(4):699-706.

[36] 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):1153-1165.

[37] 衣文平,屈浩宇,许俊香,等.不同释放天数包膜控释尿素在春玉米上的应用研究[J].核农学报,2012,26(4):699-704.