

减施配方控释肥调控土壤理化性状与 稳定夏玉米产量

任 寒, 朱国梁*, 董 浩, 郑 铮, 于淑慧, 史桂芳, 牟小翎

(泰安市农业科学研究院, 山东 泰安 271000)

摘要:【目的】减施配方控释肥能够有效提高土壤氮素水平、降低投入, 还可以减轻环境污染。因此, 研究减施配方控释肥提高氮肥利用效率, 稳定夏玉米产量具有重要意义。【方法】设置不施氮肥 (N0)、100% 普通尿素 (FP)、80% 普通尿素 (LFP)、100% 配方控释肥 (CRF) 及 80% 配方控释肥 (LCRF) 5 个处理, 探讨减量配施控释氮肥对土壤铵态氮、硝态氮、土壤酶活性及产量的影响。【结果】与普通尿素处理相比, 混合施用普通尿素和控释氮肥既能满足夏玉米生育前期的养分需求, 又能显著提高夏玉米生育后期土壤中铵态氮 (14.0%) 和硝态氮 (32.8%) 含量, 显著提高土壤中硝酸还原酶和脲酶活性。在拔节期、开花期和成熟期, CRF 处理中土壤硝酸还原酶活性较 FP 分别增加 72.9%、40.9% 和 58.8%, 土壤脲酶活性较 FP 处理分别增加 24.6%、95.9% 和 29.2%, 进而增加成熟期夏玉米根系和地上部干物质积累。在此基础上, 减施 20% 配方控释肥处理仍能保持夏玉米生育后期土壤中氮素水平, LCRF 处理中成熟期土壤铵态氮及硝态氮含量较 FP 处理分别增加 8.8% 和 13.9%, 也能维持较高的土壤中硝酸还原酶和脲酶活性。LCRF 处理中玉米各生育时期内的土壤硝酸还原酶及脲酶活性均高于 FP 处理, 满足玉米生长发育的要求, 且根系及地上部干物质积累与产量较 100% 配方控释肥无显著降低, 肥料利用率则显著提高。【结论】配方控释肥不仅能实现一次性施肥满足夏玉米整个生长季的氮肥需求, 还能有效地提高氮肥利用效率, 从而实现夏玉米减肥高效生产。

关键词: 夏玉米; 铵态氮; 硝态氮; 脲酶; 硝酸还原酶

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)06-1440-07

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021110902

任 寒, 朱国梁, 董 浩, 郑 铮, 于淑慧, 史桂芳, 牟小翎. 减施配方控释肥调控土壤理化性状与稳定夏玉米产量 [J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1440 - 1446

REN Han, ZHU Guo-liang, DONG Hao, ZHENG Zheng, YU Shu-hui, SHI Gui-fang, MU Xiao-ling. Reducing Application of Formula Controlled-release Fertilizers Regulates Soil Nitrogen Levels to Maintain Summer Maize Yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1440 - 1446

【研究意义】黄淮海地区是我国夏玉米主产区之一, 其种植面积及产量分别占全国 28% 和 30% [1]。因此, 该地区夏玉米的增产与稳产对保障国家粮食安全具有重要意义。氮素作为夏玉米生长发育过程中需求量最大的元素, 是保障作物增产的关键因素 [2-3], 然而, 目前我国玉米生产过程中氮肥投入过高, 近 30 年来氮肥施用量增长近 6 倍, 但粮食作物产量却仅增长 3 倍 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>), 肥料利用率显著降低。2019 年我国小麦、玉米、水稻三大粮食作物化肥利用率仅为 39.2% (<http://www.moa.gov.cn/>), 显著低于世界平均水平 [4]。氮素淋溶、挥发以及径流会导致土壤板结、地下水污染和温室效应加重等, 严重影响生态环境 [5]。因此, 氮肥的减施

增效倍受关注。【前人研究进展】控释氮肥具有优异的缓释性能, 可以减缓养分释放, 使其尽可能符合作物吸收养分的需求规律, 有效降低作物生育期内氮素损失, 从而提高氮素利用率, 并显著增加作物产量 [6-11]。隋常玲等 [12] 研究表明, 控释氮肥能有效抑制氮素淋溶与挥发, 降低近 26% 的氮素损失, 进而提高氮肥利用率 8% 左右。水稻施用控释氮肥, 既能满足水稻生育前期的氮素吸收需求, 提高植株根系活力以及叶片氮转化相关酶活性; 又能增强植株后期氮素吸收, 提高氮素转运, 增加养分累积, 提高作物产量 [13-18]。【本研究切入点】然而, 控释氮肥存在价格较高 (是普通尿素的 1.5 ~ 1.6 倍), 且前期养分释放较慢, 容易导致前期需肥较强的作物出

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-04-15

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-22) 资助

作者简介: 任 寒 (1993-), 男, 山东滨州人, 硕士, 农艺师, 主要从事作物栽培与土壤肥料方面的研究。E-mail: 649221679@qq.com

*通讯作者: E-mail: 15588586737@163.com

现缺氮问题^[9]。【拟解决的问题】因此, 本试验通过研究控释氮肥与普通氮肥掺混配施对夏玉米根区土壤氮素调控及产量的影响, 以期优化施肥方式, 实现夏玉米高产稳产、经济高效的生产模式。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验在泰安市岱岳区马庄镇大寺村 (35°57'36" N, 116°58'37" E)。土壤类型为棕壤, 播种前 0~20 cm 土壤有机质 15.23 g kg⁻¹, 全氮 0.86 g kg⁻¹, 全磷 0.97 g kg⁻¹, 碱解氮 80.58 mg kg⁻¹, 速效磷 37.42 mg kg⁻¹, 速效钾 84.57 mg kg⁻¹。栽培模式为小麦—玉米轮作。

1.2 试验材料及试验设计

试验始于 2020 年 6 月, 共 5 个处理, 每个处理重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积为 3 m × 8 m, 株距 22 cm, 行距 60 cm, 种植密度为 75000 株 hm⁻²。各小区间设置 2 m 保护行。供试夏玉米品种为郑单 958, 2020 年 6 月 15 日机械播种, 9 月 28 日收获。田间管理与当地农民习惯相同。尿素为普通大颗粒尿素 (N 46.4%), 控释肥为 60 天的控释尿素 (N

42.6%, 包衣率 7.38%, 包膜材料为树脂包衣), 配方控释肥为控释尿素与普通尿素按 6:4 混合而成, 各处理施氮量、施肥时期及施肥比例见表 1。磷、钾肥施肥量为: P₂O₅ 120 kg hm⁻², K₂O 120 kg hm⁻²。磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅, 12%), 钾肥为硫酸钾 (K₂O, 50%)。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤采集与测定 在拔节期 (V6)、开花期 (VT)、成熟期 (R6) 用直径 5 cm 的土钻在每个小区内采集 0~20 cm 耕层土壤, 每小区取 3 次重复。将土样立即装入放入有冰块的保温箱内带回实验室, 置于冰箱-20 °C 贮存, 并于 1 周内完成土壤酶活性的测定, 土壤酶活性指标包括硝酸还原酶和脲酶活性, 测定方法参照关松荫的《土壤酶及其研究法》^[20]。同时将一部分土壤样品风干, 用于土壤理化性质及元素分析的测定。土壤无机氮含量 (风干土壤样品) 用 0.01 mol L⁻¹ 的 CaCl₂ 浸提 (土水比 1:10), 浸提液中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量采用连续流动注射分析仪 (SEAL, AA3, 德国) 测定。

表 1 田间小区肥料试验设计方案
Table 1 Field plot fertilizer experiment design scheme

处理编号 Treatment code	氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphorous fertilizer		钾肥 Potassium fertilizer	
	施氮量 Amount (N kg hm ⁻²)	肥料种类及施用方法 Type and application way	施肥量 Amount (P ₂ O ₅ kg hm ⁻²)	肥料种类及施用方法 Type and application way	施肥量 Amount (K ₂ O kg hm ⁻²)	肥料种类及施用方法 Type and application way
0	0	0	120	过磷酸钙, 基肥	120	硫酸钾, 基肥
FP	270	尿素, 基追比 1:1	120	过磷酸钙, 基肥	120	硫酸钾, 基肥
LFP	216	尿素, 基追比 1:1	120	过磷酸钙, 基肥	120	硫酸钾, 基肥
CRF	270	配方控释肥, 基肥	120	过磷酸钙, 基肥	120	硫酸钾, 基肥
LCRF	216	配方控释肥, 基肥	120	过磷酸钙, 基肥	120	硫酸钾, 基肥

1.3.2 植株叶面积指数 在开花期量取各小区 3 棵植株绿叶长和宽, 计算叶面积指数。

LAI = 单株叶面积 (m²) × 单位土地面积株数 (株) / 单位土地面积 (m²)。

1.3.3 植株干物质积累量 在开花期取样, 将植株样品 105 °C 杀青 30 min 后 80 °C 烘至恒重, 测各部分干物质重。

1.3.4 产量及产量构成要素 各处理于完熟期收获测产, 每个处理小区收获中间 5 米 3 行, 晒干并考种, 用于测定籽粒产量及产量构成因素。

1.4 数据分析

试验数据分析采用 Excel 2010 和 DPS 15.10 软

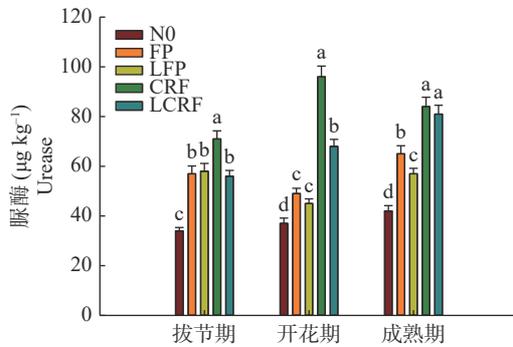
件, 利用 Sigma plot 10.0 软件作图。

2 结果分析

2.1 不同施肥处理对夏玉米土壤脲酶活性的影响

与 N0 相比, FP 和 CRF 处理土壤中脲酶活性在拔节期、开花期和成熟期分别提高 67.6%、32.4% 和 54.8%; 108.8%、159.5% 和 100% (图 1)。普通尿素减施 20% 对拔节期、开花期土壤中脲酶活性无显著影响, 但是可以显著降低玉米成熟期土壤脲酶活性。配方控释肥减施 20% 显著降低玉米生育前期土壤中脲酶活性, 但是对成熟期土壤脲酶活性无显著影响。然而在开花期和成熟期, LCRF 的土壤脲酶

活性仍显著高于 FP 处理。本研究结果表明，施用氮肥可显著提高土壤中脲酶活性，且配方控释肥对土壤脲酶活性的影响更为显著。



注:不同小写字母表示处理间有显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理的土壤脲酶活性变化

Fig.1 Changes of soil urease activities in different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对夏玉米土壤硝酸还原酶活性的影响

在拔节期、开花期和成熟期，CRF 处理中土壤硝酸还原酶活性较 FP 分别增加 72.9%、40.9% 和 58.8% (图 2)。土壤中硝酸还原酶活性对普通尿素减施 20% 和配方控释肥减施 20% 的响应趋势差异显著。配方控释肥减施 20% 可显著降低玉米拔节期和开花期土壤中硝酸还原酶活性，但是对成熟期土壤脲酶活性无显著影响。普通尿素减施 20% 显著增加拔节期土壤硝酸还原酶活性，但是降低其在开花期和成熟期的活性。然而，各夏玉米生育时期内 LCRF 处理中土壤硝酸还原酶活性均高于 FP 处理。本研究结果表明，施氮能显著提高土壤中硝酸还原酶活性，且配方控释肥较普通尿素对其影响更为显著。

2.3 不同施肥处理对夏玉米土壤铵态氮、硝态氮含量的影响

在拔节期、开花期和成熟期，FP 处理土壤中铵

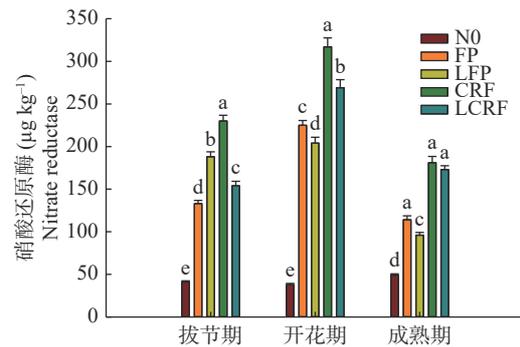


图 2 不同施肥处理土壤硝酸还原酶活性的变化

Fig.2 Changes of soil nitrate reductase activities under different fertilization treatments

态氮、硝态氮含量较 N0 分别增加 76.7%、80.6% 和 78.1%；94.8%、92.4% 和 50.6% (图 3)。配方控释肥能减缓氮素释放，提高夏玉米中后期土壤氮素水平。本研究结果表明，拔节期 CRF 土壤中铵态氮、含量略低于 FP 处理，然而在成熟期其含量均显著高于 FP。减施氮肥显著降低土壤中氮素含量，在开花期和成熟期，LFP 处理土壤中铵态氮、硝态氮含量较 FP 处理分别降低 9.2% 和 5.3%；24.5% 和 14.8%，且显著低于 CRF、LCRF 处理。在拔节期与 FP 处理相比，LCRF 处理中土壤铵态氮、硝态氮含量相对较低；然而，在成熟期 LCRF 处理中土壤铵态氮含量较 FP 处理则增加 8.8%。

2.4 不同施肥处理对夏玉米根系干重的影响

在拔节期、开花期和成熟期，FP 处理的根系干重分别较 N0 处理增加 120.8%、42.7% 和 35.8% (图 4)。与普通尿素相比，配方控释肥能显著提高夏玉米生育后期根系干重。在开花期和成熟期，CRF 处理中玉米根系干重较 FP 分别增加 10.9% 和 13.4%。减施氮肥能显著降低夏玉米根系干重。在拔节期和开花期，LCRF 处理的根系干重显著低于 CRF 处理，分别较其降低 14.6% 和 11.0%，然而，

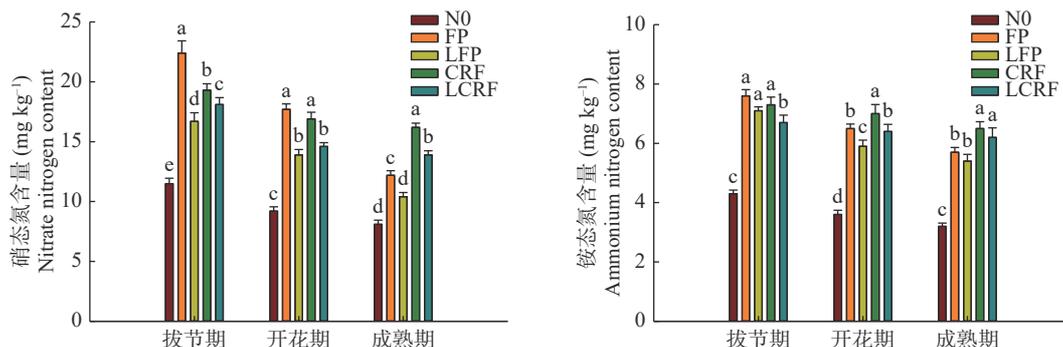


图 3 不同施肥处理中土壤硝态氮、铵态氮含量的变化

Fig.3 Changes of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents in different fertilization treatments

成熟期 LCRF 处理的根系干重与 CRF 差异不显著。在拔节期、开花期和成熟期, LFP 处理根系干重分别较 FP 处理降低 17.0% 和 10.2% 和 9.1%。另外, LCRF 玉米开花期根系干重与 FP 处理差异不显著, 且 LCRF 处理玉米成熟期的根系干重较 FP 处理增加 12.2%。本研究结果表明, 施氮能显著提高夏玉米根系干重。

2.5 不同施肥处理对夏玉米株高、叶面积指数以及地上部生物量的影响

在夏玉米开花期, 各施氮处理的株高均显著高于 N0, 具体表现为 CRF > FP > LCRF > LFP > N0, 但各施肥处理间植株高度差异不显著 (表 2)。另外, 施用氮肥显著增加了夏玉米叶面积指数, 且施用配方控释肥效果最为显著。CRF 的叶面积指数显著高于 FP 处理, 减施氮肥 20% 对叶面积指数无显著影

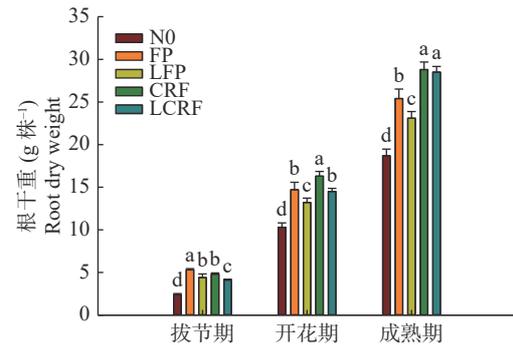


图 4 不同施肥处理的植株根系干重变化
Fig.4 Changes of plant root dry weight under different fertilization treatments

响。另外, CRF 地上部干物质重显著高于 FP 处理; LFP 的地上部干物质积累量较 FP、LCRF 处理均显著降低。然而, LCRF 处理的地上部干物质积累与 CRF 无显著差异, 且其较 FP 处理显著增加。

表 2 不同施肥处理对夏玉米植株农艺性状的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on agronomic characteristics of summer maize plants

处理 Treatment	株高(cm) Plant height	LAI	地上部生物量(t hm ⁻²) Dry matter weight
N0	217.38 b	3.22 c	11.56 d
FP	245.65 a	3.83 b	16.43 b
LFP	241.24 a	3.68 b	14.75 c
CRF	248.17 a	4.21 a	20.32 a
LCRF	243.49 a	4.14 ab	18.28 a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间有显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.6 不同施肥处理对夏玉米产量及产量构成因素的影响

本研究结果表明, 施氮可以显著提高夏玉米穗粒数和千粒重, 从而提高其产量, 且配方控释肥较普通尿素增产效果更显著 (表 3)。与 N0 相比, FP 和 CRF 处理的穗粒数和千粒重分别增加 41.5% 和 7.3%; 53.1% 和 9.1%。与 FP 相比, CRF 处理每公顷穗数与千粒重无显著差异, 但穗粒数显著增加, 从而导致玉米产量较 FP 处理显著增加。与 FP 相比, LFP 处理穗粒数降低 7.8%, 产量显著降低 11.8%。然而, 与 FP 相比, LCRF 处理的穗粒数和产量无显著差异。

3 讨论

氮肥的施用对提高作物产量具有重要的意义。然而, 由于农户盲目施肥, 降低了氮肥利用率, 投入到农业系统中的大量氮肥通过淋溶、径流和挥发等途径进入水体和空气, 严重污染生态环境^[21]。因此,

结合作物的需肥规律, 选用适宜的氮肥类型, 合理的氮肥用量, 恰当的施肥时间, 从而提高肥料利用效率对农业生产具有重要的意义^[22]。但是, 随着机械化生产的发展, 一次性氮肥基施的施肥方式是农业发展的一种重要趋势。然而, 普通尿素施入土壤后养分释放快, 导致土壤中氮素含量在夏玉米生育前期高, 而在其生育中后期, 土壤中氮素含量低, 不能满足夏玉米逐步增强的需氮要求, 导致玉米早衰, 产量降低^[23]。近年来, 通过包膜技术控制养分释放, 从而使土壤中有效养分含量控制在一个适量水平是肥料生产的一个重要方向。但是, 前人研究指出, 由于控释氮肥养分释放速度慢, 可能会出现前期氮素供给不足的问题^[24]。因此, 合理比例的普通尿素和控释氮肥混合施用, 以满足夏玉米整个生育时期的氮肥需求, 是保障玉米高产、提高氮肥利用率、减少氮素损失的关键。本研究结果表明, 在相同氮肥施用量条件下, 混合施用普通尿素和控释氮肥 (CRF) 既能满足夏玉米生育前期的养分需求, 又能显著提

表 3 不同施肥处理夏玉米产量及其构成因素
Table 3 Yield of summer maize and its components in different fertilization treatments

处理 Treatment	穗数 Ear per hm ²	穗粒数 Grain number (per ear)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate (%)
N0	71750 a	334.7 d	314.5 b	6387 d	-56.8
FP	74050 a	473.5 b	337.6 a	10050 b	0
LFP	72885 a	436.4 c	331.7 a	8867 c	-11.8
CRF	73860 a	512.4 a	343.2 a	11021 a	9.7
LCRF	72960 a	489.7 ab	340.2 a	10289 ab	2.4

高夏玉米生育后期土壤中铵态氮和硝态氮含量, 提高成熟期夏玉米根系和地上部干物质积累, 提高作物产量。且在此基础上, 减施 20% 氮肥处理 (LCRF) 仍能保持夏玉米生育后期土壤中氮素水平, 满足玉米生长发育的要求, 根系和地上部干物质积累与产量较 CRF 无显著降低, 肥料利用率显著提高。因此, 配方控释肥不仅能实现一次性施肥满足玉米整个生长季的氮肥需求, 还能有效地提高氮肥利用效率, 从而实现玉米减肥高效生产。

脲酶是土壤中的主要水解酶类之一, 脲酶可催化尿素水解为 NH₃, 并进一步通过质子转换成 NH₄⁺。因此, 脲酶活性的高低与土壤的氮素状态显著相关^[25]。前人研究指出, 包膜控释肥以包膜材料阻滞核内尿素与土壤脲酶接触, 从而减缓尿素的水解与转换进程, 推迟铵态氮峰期, 维持土壤中较高的铵态氮含量, 降低氮损失, 而普通施肥模式与之相反^[26-27]。研究表明^[28-30], 若较早的出现铵态氮峰期, 会增加氨挥发损失, 进而抑制植株在生长中后期的氮素吸收能力。本研究结果表明, CRF 及 LCRF 处理中脲酶活性显著高于 FP 和 LFP 处理, 为激发硝化作用提供 NH₄⁺底物, 说明配方控释肥可能通过提高脲酶活性, 促进尿素的水解和氮素形态转化, 从而提高作物对氮素的吸收利用效率。另外, 本研究表明, 施用普通尿素和控释氮肥显著提高了土壤中硝酸还原酶活性。硝酸还原酶能够催化硝态氮转化成 NO₂⁻, 然后经亚硝酸还原酶 (Nitrite reductase, NiR) 催化形成羟胺 (NH₂OH), 再经过羟胺还原酶 (Hydroxylamine reductase, HyR) 进一步催化还原成 NH₄⁺被作物吸收利用。在夏玉米生长中后期, CRF 及 LCRF 处理中硝酸还原酶活性显著高于 FP 和 LFP 处理, 能更好的维持土壤中 NH₄⁺水平, 改善土壤微生物环境, 保证夏玉米根系对于氮素的吸收, 有利于地上部生物量的积累。

合理的施肥措施能够保障作物对养分需求的动

态进程, 匹配养分在关键生育期供应^[31-32]。施用适宜配方控释肥通过维持土壤耕层高水平氮素浓度, 减少氮损失, 满足作物在生育中后期养分需求, 促进作物氮素吸收, 提高地上部干物质积累^[33-34], 从而实现增产和提高氮素利用率^[35-36]。本研究表明, 配方控释肥显著改善夏玉米农艺性状, 提高根系干重, 增加地上部生物量, 且 CRF 与 LCRF 处理间相互比较无显著差异。叶片光合能力强弱与光合面积大小是决定干物质与氮积累的核心因素之一^[37-38]。本研究表明, 配方控释肥处理的夏玉米叶片发育良好, 其长、宽、面积均较优, 从而提高了植株叶面积指数, 成为有利于提高光合功能, 实现夏玉米高产的主要生理原因, 且 CRF 与 LCRF 处理间无显著差异。就产量而言, 配方控释肥能增加夏玉米穗粒数及千粒重, 提高夏玉米产量。并且, 与 CRF 处理相比 LCRF 处理的夏玉米产量略低, 但差异不显著。这充分说明了配方控释肥减量施用仍能维持较好的土壤地力, 满足夏玉米的养分需求。

4 结论

配方控释肥通过调控氮素释放速率, 能够维持土壤中适宜的铵态氮、硝态氮含量, 并保持夏玉米生长中后期土壤中硝酸还原酶、脲酶活性, 从而促进夏玉米根系的生长发育以及地上部生物量的积累, 进而提高夏玉米产量。并且, 适量减施配方控释肥仍能够满足夏玉米各生育时期的氮素需求, 保障夏玉米产量。

参考文献:

- [1] 陆伟婷, 于欢, 曹胜男, 等. 近20年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3132-3145.
- [2] 刘全凤, 刘永震, 曹金锋, 等. 控释氮肥用量对环渤海潮土区棉花产量及氮肥利用率的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(2): 275-279.

- [3] 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.
- [4] 闫 湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 292(6): 1067 - 1077.
- [5] 王子胜, 徐 敏, 刘瑞显, 等. 施氮量对不同熟期棉花品种的生物量和氮素累积的影响[J]. 棉花学报, 2011, 23(6): 537 - 544.
- [6] 张 桥, 樊小林. 我国控释肥料生产应用现状与发展对策[J]. 广东农业科学, 2005, (1): 52 - 53.
- [7] 黄永兰, 罗奇祥, 刘秀梅, 等. 包膜型缓/控释肥技术的研究与进展[J]. 江西农业学报, 2008, (3): 55 - 59 + 63.
- [8] 徐浩龙. 淀粉/聚丙烯酸/胶磷矿缓释肥包膜材料的制备及性能研究[J]. 湖南农业科学, 2012, (7): 62 - 64.
- [9] 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.
- [10] 任利沙, 顾日良, 贾光耀, 等. 灌浆期控水和施用控释肥对杂交玉米制种产量和种子质量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3108 - 3118.
- [11] 刘 敏, 宋付朋, 卢艳艳. 硫膜和树脂膜控释尿素对土壤硝态氮含量及氮素平衡和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 541 - 548.
- [12] 隋常玲, 张 民. ~ (15)N示踪控释氮肥的氮肥利用率及去向研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(9): 120 - 127.
- [13] 聂 军, 肖 剑, 戴平安, 等. 控释氮肥对水稻氮代谢关键酶活性及糙米蛋白质含量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, (4): 318 - 321.
- [14] 黄思怡, 田 昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2102 - 2112.
- [15] 田 昌, 周 旋, 黄思怡, 等. 控释尿素减施对稻田CH₄和N₂O排放及经济效益的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2223 - 2230.
- [16] Wang S, Zhao X, Xing G, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 1103 - 1115.
- [17] 杜 君, 孙克刚, 张运红, 等. 控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 134 - 141.
- [18] 纪雄辉, 罗兰芳, 郑圣先. 控释肥料对提高水稻养分利用率和削减稻田土壤环境污染的作用[J]. 磷肥与复肥, 2007, (2): 67 - 68.
- [19] 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.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 农业出版社, 1986.
- [21] 倪秀菊. 几种抑制剂对尿素水解和土壤硝化作用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [22] 郭 海, 杨鹏金, 李录久, 等. 氮肥基追比例运筹方式对水稻生长和肥料利用效率的影响[J]. 现代农业科技, 2015, (20): 20 + 27.
- [23] 王秀超. 脲醛氮肥与普通尿素配施对小麦、玉米生长及土壤氮素含量的影响[D]. 青岛农业大学, 2017.
- [24] 宋付朋, 张 民, 史衍玺, 等. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J]. 土壤学报, 2005, (4): 619 - 627.
- [25] 任佰朝. 淹水影响夏玉米生长发育的生理机制及其调控[D]. 山东农业大学, 2017.
- [26] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氨挥发特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2943 - 2949.
- [27] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1449 - 1457.
- [28] Jiang B, Xu, You Z, et al. Soil microbial mechanisms of *Stevia rebaudiana* (Bertoni) residue returning increasing crop yield and quality[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2013.
- [29] Turner D A, Edis R E, Chen D, et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to cereals in two cropping areas of southern Australia[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(2): 113 - 126.
- [30] Wang J, Wang D, Gang Z, et al. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1): 73 - 84.
- [31] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 中国农业大学出版社, 2009.
- [32] 郑剑超, 闫曼曼, 张巨松, 等. 遮荫条件下氮肥运筹对棉花生长和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, (1): 94 - 103.
- [33] 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, 000(3): 518 - 528.
- [34] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4892 - 4902.
- [35] Chalk P M, Craswell E T, Polidoro J C, et al. Fate and efficiency of 15 N-labelled slow- and controlled-release fertilizers[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015.
- [36] 辛志远, 王昌全, 申亚珍, 等. 水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 109 - 114.
- [37] 聂 军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学, 2005, (3): 255 - 261.
- [38] 李国强, 汤 亮, 张文宇, 等. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2258 - 2265.

Reducing Application of Formula Controlled-release Fertilizers Regulates Soil Nitrogen Levels to Maintain Summer Maize Yield

REN Han, ZHU Guo-liang*, DONG Hao, ZHENG Zheng,
YU Shu-hui, SHI Gui-fang, MU Xiao-ling
(*Taian Academy of Agricultural Sciences, Taian 271000, China*)

Abstract: [Objective] Reducing application of controlled-release fertilizers can effectively increase soil nitrogen (N) levels, reduce N input, and reduce environmental pollution. Therefore, the reducing application amount of controlled-release fertilizers to regulate soil N levels and maintain summer maize yield is of great significance for guiding scientific fertilization. [Method] Five treatments were set up for no N fertilizer (N0), 100% regular urea (FP), 80% regular urea (LFP), 100% formulated controlled-release fertilizer (CRF) and 80% formulated controlled-release fertilizer (LCRF). Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, enzyme activities and yield were determined in these treatments. [Result] The results showed that the mixed application of common urea and controlled-release N fertilizer could not only meet the nutrient requirements in the early growth period of summer maize, but also significantly increase the contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the soil during the later growth period of summer maize, and significantly increase the activities of nitrate reductase and urease in the soil. At the jointing stage, flowering stage and maturity stage, the soil nitrate reductase activities in the CRF treatment increased by 72.9%, 40.9% and 58.8%, respectively, and the soil urease activities increased by 24.6%, 95.9% and 29.2%, respectively, compared with the FP treatment. The 20% reduction of formula controlled-release fertilizer treatment could still maintain the N level in the late growth stage of summer maize. And the LCRF treatment increased the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in the mature stage soil by 8.8% and 13.9% compared with the FP treatment. The activities of nitrate reductase and urease activities in the LCRF treatment were higher than those of FP treatment in each growth period, which met the requirements of maize growth and improved fertilizer utilization rate. [Conclusion] In summary, the formulated controlled-release fertilizer can not only realize the one-time fertilization to meet the N fertilizer demand of the summer corn growing season, but also effectively improve the N fertilizer utilization efficiency, so as to realize the weight-loss and high-efficiency production of summer maize.

Key words: Summer corn; Ammonium Nitrogen; Nitrate nitrogen; Urease; Nitrate reductase

[责任编辑: 刘轶飞]