

控释掺混肥一次性减量施用对夏玉米产量、 氮肥利用和叶片氮代谢酶活性的影响

曹 兵^{1, 2}, 黄志浩³, 吴广利³, 梁红胜⁴, 陈延华^{1, 2}, 左 强^{1, 2},
倪小会^{1, 2}, 邹国元^{1, 2}, 王学霞^{1, 2*}

(1. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2. 北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 河北萌帮水溶肥股份有限公司, 河北 石家庄 050000; 4. 内蒙古农业大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘 要: 探索一次性施用控释掺混肥对夏玉米产量、氮肥利用效率和叶片氮代谢关键酶活性的影响, 为化肥减施增效提供技术支撑。以夏玉米品种‘明科玉 77’为材料进行了大田试验, 试验设 5 个处理, 分别是不施氮 (CK)、常规施氮 (U100) 和 3 个控释掺混肥处理 (CBB100、CBB90 和 CBB80, 较 U100 分别减氮 0、10% 和 20%), 分析调查了夏玉米产量、氮素利用效率、叶片氮代谢关键酶活性、施肥经济效益和土壤无机氮动态。结果表明, 控释氮肥在田间的释放主要集中在夏玉米生长前中期, 夏玉米拔节和收获时氮素累积释放率分别为 56.2% 和 86.2%。与 U100 相比, CBB80、CBB90 和 CBB100 处理的夏玉米产量分别提高 -2.64%、4.41% 和 9.41%, 氮肥农学利用率分别增加 -0.03、2.99 和 4.45 kg · kg⁻¹, 氮肥利用率提高 16.6% ~ 29.5%, 氮肥偏生产力增加 4.45 ~ 10.25 kg · kg⁻¹, 每公顷净收益 (扣除肥料投入) 分别增加了 -108、816 和 1442 元。施氮显著提高了夏玉米抽雄期叶片硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶、谷氨酸脱氢酶活性, CBB90 和 CBB100 处理叶片酶活性高于 U100, 其中谷氨酰胺合成酶活性差异显著, 其他差异均不显著。综合夏玉米产量、氮肥利用率和施肥经济效益等因素, 不减氮一次性施用控释掺混肥的效果最好。

关键词: 夏玉米; 控释掺混肥; 产量; 氮肥利用效率; 氮代谢酶

氮肥作为农作物增产的重要因素之一, 施入农田土壤后部分会通过氨挥发、淋洗和硝化、反硝化等各种迁移、氮素转化途径而损失^[1-4]。造成氮肥损失的主要原因是氮肥供应与作物吸收不一致。缓控释肥相比速效性化肥能够更好地调节和控制氮肥在土壤中的释放和转化, 在提高氮肥利用率和降低氮素淋失方面效果明显^[4-7]。

玉米是我国三大粮食作物之一, 2017 年的种植面积 0.42 亿 hm², 排名全球第一, 其中黄淮海平原是夏玉米主产区, 占全国玉米种植面积的 43.4%^[8]。近年来随着农村人口持续向二三产业转

移, 直接从事农业生产的劳动力短缺且老龄化问题日益突出。农业生产的轻简化已成为当下和未来农业发展趋势。氮肥作为玉米生长发育的关键生命元素, 对其生理特性和产量的影响较大, 合理施氮在玉米增产诸因素中起主要作用^[9]。夏玉米生产中一次性施肥技术应用已日益普遍, 控释氮肥作为一次性施肥技术的载体, 在夏玉米上施用表现出增产增收、节肥省工、提高氮肥利用效率和降低氮素损失等方面的良好效果^[1, 3, 10-12]。Xia 等^[13]采用 meta-analysis 对在玉米上一次性基施缓控释肥 (截止到 2016 年) 的应用效果进行了统计分析, 结果表明, 与常规施肥相比, 缓控释肥可使玉米增产 8.3%, 氮肥利用率平均提高 37.5%, 净收入平均增加 7.8%, 氨挥发、N₂O 排放、氮淋溶和氮径流分别平均降低了 58.6%、24.5%、25.7% 和 22.4%。叶片硝酸还原酶 (NR)、谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸合成酶 (GOGAT)、谷氨酸脱氢酶 (GDH) 是作物氮素同化的关键酶, 在氮素同化和运转中均起决定作用, 能直接反映作物的氮素营养水平^[14]。金

收稿日期: 2020-04-29; 录用日期: 2020-06-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200705); 中央引导地方科技发展专项 (19941404G); 北京市农林科学院创新能力建设专项 (KJCX20190302, KJCX20200419)。

作者简介: 曹兵 (1970-), 男, 湖北宜都人, 副研究员, 博士, 主要从事新型肥料研究。E-mail: caobing@baafs.net.cn。

通讯作者: 王学霞, E-mail: wx0427@163.com。

容等^[15]的研究证实,控释氮肥通过有效促进玉米生育后期叶片GS、GDH、谷草转氨酶活性等氮代谢关键酶活性而促进玉米氮素转换与积累,进而提高玉米产量。

为了研究方便,目前有关夏玉米上施用控释氮肥的试验施肥方案大多由实验者自制的单质氮磷钾肥组成^[10, 12, 15-17],其肥料组成与肥料企业生产的控释掺混肥产品有较大差异,其研究结果并不能完全等同控释掺混肥的作用和效果。而本研究结合华北夏玉米的养分需求规律,使用了控释氮肥释放周期为60 d的控释掺混肥^[10, 12],拟通过田间小区试验研究控释掺混肥对夏玉米产量、氮肥利用效率、叶片氮代谢关键酶活性和经济效益的影响,

以期为促进控释肥推广应用和化肥减施增效提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点基本情况

田间试验布置在河北赵县六市庄村(37° 47' 34.94" N, 114° 41' 37.71" E),夏玉米品种为明科玉77,2019年6月28日播种,10月5日收获。供试土壤为褐土,0~20 cm土壤理化性状为:有机质1.87%,全氮1.9 g·kg⁻¹,有效磷53.6 mg·kg⁻¹,速效钾140.0 mg·kg⁻¹,pH 7.64,EC值15.9 μS·cm⁻¹。夏玉米生育期总降水量为362 mm,地温和降水分布见图1。

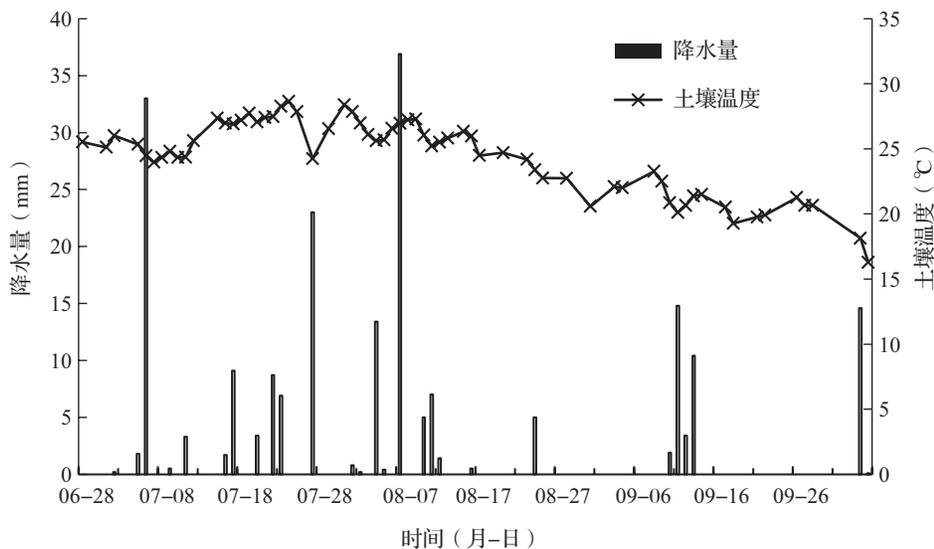


图1 夏玉米生长季降水量与土壤温度

1.2 供试肥料

试验所用控释掺混肥由河北萌帮水溶肥股份有限公司生产,掺混肥中控释氮在25℃水浸泡条件下氮素累积释放80%所需时间为60 d。

控释氮肥在土壤中的释放检测采用田间埋设肥料网袋的方法进行。准确称量肥料样品5.00 g,装入长20 cm、宽5 cm的尼龙网袋内,埋前在网袋内装入100 g表层土与肥料混匀,然后埋入深15 cm土中,共埋15袋,分别在苗期、拔节期、大喇叭口期、灌浆期和收获期取样,每次取3袋,用自来水将泥土冲洗干净,自然晾干,用常规方法测定膜内的残留氮含量^[16],计算控释氮肥溶出率。

1.3 试验设计

试验共设5个处理,分别为不施氮对照

(CK),常规施氮(尿素46%,U100),控释掺混肥CBB100(N:P₂O₅:K₂O=24:10:10)、控释掺混肥CBB90(较CBB100减氮10%)和控释掺混肥CBB80(较CBB100减氮20%),控释掺混肥中控释氮肥占掺混肥总氮比均为30%。小区面积40 m²(10 m×4 m),4次重复,完全随机排列。各处理磷肥和钾肥用量相同,其中CK和U100处理所用磷肥为普钙,钾肥为氯化钾,控释掺混肥中磷肥与氮肥为磷酸二铵和硫酸铵,钾肥为氯化钾。

U100和CBB100的N、P₂O₅、K₂O用量分别为180、75和75 kg·hm⁻²,U100的氮肥70%作基肥、30%在大喇叭口期追施,CK和U100处理的磷钾肥及控释掺混肥均在播种前一次性基施。

1.4 取样与测定方法

1.4.1 土壤取样与检测

在玉米生长苗期、拔节期、大喇叭口期、灌浆期及收获期分别采用“S”型采样法采集0~20 cm土壤,在每个小区内选择4个重复。土样储藏于-20℃冰箱中用于测定土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量。NH₄⁺-N、NO₃⁻-N采用流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe, German)测定。

1.4.2 玉米产量和植株氮素含量

在收获期测定各小区夏玉米产量并随机选取10株进行考种,测定穗粒数与千粒重,植株样品按籽粒和秸秆(茎秆和叶)部位分开,置于烘箱中于105℃杀青30 min,70℃烘干并称重,样品粉碎后用凯氏定氮法测定全氮含量^[18]。

1.4.3 酶活性

夏玉米叶片硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酸脱氢酶(GDH)活性均利用试剂盒(南京建成生物工程有限公司)进行测定。其中NR以每小时每毫克组织蛋白催化产生1 μmol NO₂⁻的量作为一个NR活力单位。GS以每毫克组织蛋白在每毫升反应体系中每分钟使540 nm下吸光值变化0.01定义为一个酶活力单位,GOGAT和GDH以每毫克组织蛋白在反应体系中每分钟消耗1 μmol NADH定义为一个酶活力单位。

1.5 数据处理

氮肥利用率(%) = (施氮区玉米吸氮量 - 不施氮区玉米吸氮量) / 施氮量 × 100

氮肥农学效率(kg·kg⁻¹) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = 玉米产量 / 施氮量

采用SAS 6.12软件中ANOVA程序对数据进行单因素方差分析,5%显著水平。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥田间氮素释放

控释氮肥在夏玉米生长期间的氮素累积释放如图2所示。从图中可以看出,苗期和拔节期控释氮肥的累积释放率分别为25.0%和51.6%,夏玉米收获时(收获期)氮素累积释放率达到86.2%。上述结果说明控释氮肥在田间的氮素释放主要分布在夏玉米生育前中期,其氮素释放与夏玉米生育期较好吻合,一次性施用控释掺混肥能满足玉米全生育期

的氮素需求。

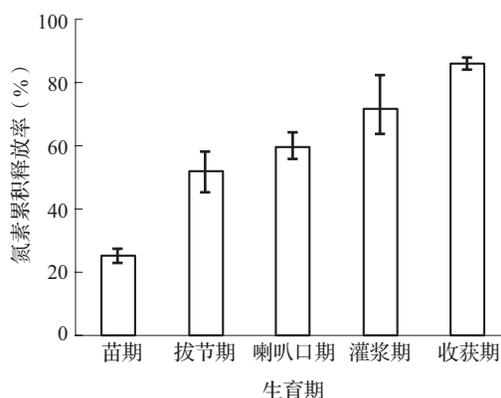


图2 控释肥田间释放动态

2.2 控释掺混肥料对夏玉米产量与氮素吸收的影响

由表1可见,CBB100和CBB90较CK显著增加了夏玉米产量($P<0.05$),增幅分别为25.6%和19.9%;U100和CBB80的夏玉米产量较CK分别增加14.8%和11.8%,但差异未达到显著性水平。与常规施氮(U100)相比,CBB100和CBB90的夏玉米分别增产9.41%和4.41%,差异不显著,CBB80夏玉米产量几乎没有差异,究其原因CBB100和CBB90处理显著增加了夏玉米的穗粒数($P<0.05$) (表2)。

表1 不同施肥处理夏玉米产量及产量因子构成因素

处理 (Treatment)	穗粒数 (粒) (Grain number (grains))	千粒重 (g) (Thousand grain weight (g))	产量 (kg·hm ⁻²) (Yield (kg·hm ⁻²))
CK	328.2d	281.8a	7400b
U100	379.3b	280.1a	8500ab
CBB100	411.6a	282.4a	9300a
CBB90	390.8b	283.8a	8875a
CBB80	360.0c	287.2a	8275ab

注:同列小写字母不同表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

施氮显著提高了夏玉米籽粒和秸秆的含氮量和吸氮量(表2)。与常规施氮(U100)相比,控释掺混肥提高了夏玉米籽粒的含氮量和吸氮量,但秸秆含氮量和吸氮量则低于前者;控释掺混肥提高了夏玉米的氮肥利用效率(表2),其中氮肥利用率提高了16.6~29.5个百分点,氮肥偏生产力提高了4.45~10.25 kg·kg⁻¹,氮肥农学利用率除CBB80几乎持平外,CBB100和CBB90处理分别提高了4.45和2.99 kg·kg⁻¹。

表 2 不同施肥处理氮素吸收及氮肥利用效率

处理	籽粒含氮量 (%)	秸秆含氮量 (%)	籽粒吸氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	秸秆吸氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥利用率 (%)	氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	0.803b	0.673b	62.5c	69.8c	—	—	—
U100	0.950ab	0.905a	80.7b	103.4a	28.8	47.22	6.11
CBB100	1.06a	0.837a	98.5a	100.9a	37.3	51.67	10.56
CBB90	1.03a	0.836a	91.5ab	99.3a	36.2	54.78	9.10
CBB80	1.06a	0.793b	87.7b	92.9ab	33.6	57.47	6.08

2.3 叶片氮代谢关键酶活性

夏玉米抽雄期叶片氮代谢关键酶活性如图3所示。叶片硝酸还原酶(NR)活性表现为 $\text{CK} < \text{CBB80} < \text{U100} < \text{CBB90} < \text{CBB100}$ ，而谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性均呈现为 $\text{CK} < \text{U100} <$

$\text{CBB80} < \text{CBB90} < \text{CBB100}$ ，而且施氮显著增加了4类氮代谢关键酶活性。在4个施氮处理中，除了CBB100较U100的GS活性显著增加($P < 0.05$)，其他差异均不显著。CBB90和CBB100处理的叶片酶活性高于常规施氮的结果，说明抽雄期前者氮的供应优于后者。

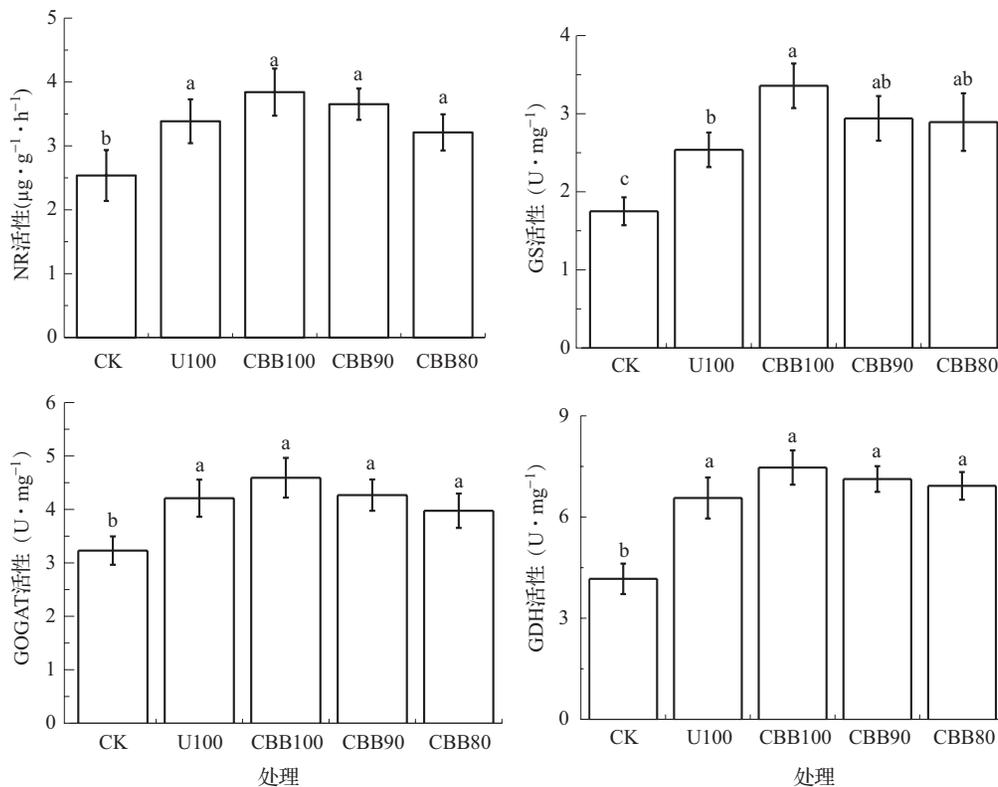


图 3 不同施肥处理夏玉米叶片氮代谢关键酶活性

注：小写字母不同表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4 施肥经济效益分析

施氮处理较不施氮对照均能增收，每公顷净收益增加 527 ~ 2120 元 (表 3)。从表中还可以看出，与 U100 相比，CBB100 和 CBB90 的产值和净收入分别增加 4.41% ~ 9.41% 和 5.31% ~ 10.4%，

CBB80 略低但差异极小。此外，虽然控释掺混肥价格高于速效性化肥，但因采用一次性施肥节省了追肥所需劳动力投入，故除了 CBB100 处理总的施肥投入略高于 U100 外 (每公顷增加 38 元)，CBB90 和 CBB80 的施肥投入反而低于常规施肥。上述结

果说明, 在减氮 10% 以内, 采用控释掺混肥能获得更大的种植收益。

表 3 不同施肥处理的经济效益

处理	产值 (元·hm ⁻²)	肥料成本 (元·hm ⁻²)	追肥 劳力投入 (元·hm ⁻²)	净收入 (元·hm ⁻²)
CK	12580	690	—	11890
U100	14450	1462	300	12688
CBB100	15810	1800	—	14010
CBB90	15087	1725	—	13362
CBB80	14067	1650	—	12417

注: 2019 年夏玉米市场价格 1.7 元·kg⁻¹, 尿素 2000 元·t⁻¹, 普钙 (磷酸二氢钙) 820 元·t⁻¹, 氯化钾 2420 元·t⁻¹, 3 种控释掺混肥分别为 2400、2300 和 2200 元·t⁻¹, 追肥人工费用 300 元·hm⁻²。

3 讨论

3.1 控释掺混肥对夏玉米产量和氮肥吸收效率的影响

受限于缓控释肥相对较高的价格, 为了有效控制肥料投入成本, 在低附加值粮食作物上, 大多采用部分缓控释肥和速效性化肥配制成缓控释掺混肥, 推动了其在玉米、小麦等作物上大面积应用^[6, 19]。本研究中, 控释氮肥在夏玉米生长中前期的氮素释放较多, 至拔节期时氮素累积释放已达到 51.6% (图 2), 与该时段温度较高且降水较为集中是一致的 (图 1), 因为控释肥养分释放速率主要受温度和水分驱动^[20]。夏玉米收获时控释氮肥累积释放 86.2%, 与夏玉米生育期基本吻合 (图 2), 确保了采用一次性施肥的控释掺混肥与夏玉米生长期的氮素需求一致。相关研究表明, 释放期为 60 d 的控释肥更能保障夏玉米高产和提高氮肥利用效率^[10, 21-22]。相比常规分次施氮, 等氮量和减氮 10% 的控释掺混肥使得夏玉米分别增产 9.41% 和 4.41%, 与多年多点玉米控释肥试验平均增产 8.2% 的结果相符^[12], 控释掺混肥即使减氮 20% 也基本未造成夏玉米减产。此外, 不同施氮量下, 控释掺混肥的氮肥利用效率 (氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力) 大多高于常规施氮 (表 2), 与相关研究结果一致^[12-13]。控释肥能提高作物产量和氮肥利用效率的主要原因是其氮素释放特征与作物吸氮规律高度吻合^[7], Zhang 等^[23] 研究表明, 控释肥的氮素释放与直播稻氮素吸收呈显著的线性相关, 相比常规施肥即使减氮 1/3 还能显著增产, 氮肥利用

率大幅提高。

控释肥较常规施肥的施肥投入成本平均增加 6.4%, 但因产值更高, 净收益反而平均增加 7.8%^[13]。本研究中, 控释掺混肥的肥料投入较常规施氮增加 12.8% ~ 23.1%, 但考虑追肥的劳动力成本后, 除了等氮量控释掺混肥的施肥投入略超常规施氮 (增加 2.1%), 减氮 10% 和 20% 的控释掺混肥较常规施肥反而降低了 2.1% 和 6.4% (表 3)。3 个控释掺混肥处理的夏玉米净收入较常规施氮分别增加 -2.1%、5.3% 和 10.4%, 结果与以往研究结果类似^[13]。相对来说, 减氮 10% 的控释掺混肥在节肥和控制肥料投入成本的情况下, 既能满足夏玉米高产的氮素需求, 又实现了作物增产和农民增收^[24]。

3.2 控释掺混肥对夏玉米叶片酶活性的影响

作物氮代谢关键酶通过影响植物体内氮的同化和氨基酸的合成, 进而调控作物代谢和发育的重要生理过程^[25]。作物吸收的氮在一系列氮代谢酶 (NR、GS、GOGAT 及 GDH) 催化下形成各种功能物质, 其中 NR 是作物氮代谢的关键酶和限速酶, 其活性高低表征作物体内氮同化能力^[26], GS 和 GOGAT 偶联形成的循环反应是作物氮代谢的主要途径, 是氮代谢的中心, GDH 途径是氮代谢的重要支路, 在 NH₄⁺-N 的再利用过程中占有一定地位^[27-28]。本研究中, 与 CK 相比, 施氮显著提高了叶片氮代谢关键酶活性, 这与吴雅薇等^[26] 的研究结果一致。与 U100 相比, CBB100 和 CBB90 处理抽雄期叶片氮代谢关键酶活性增加, 这主要是由于尿素在土壤中转化较快, 肥效持续时间相对较短, 而控释氮肥能有效降低或控制养分释放速率, 使得控释氮肥的释放与玉米生长关键时期的氮素需求相匹配, 减少肥料挥发和淋溶损失^[15, 28-29], 从而有利于提高玉米生长中后期叶片氮代谢酶活性, 增加此阶段玉米氮素转化与积累。这与金容等^[15] 在玉米上的研究结果基本一致, 表明控释掺混肥在提高玉米叶片氮代谢关键酶活性的效果优于尿素, 从而保证了夏玉米生长中后期氮代谢的高效运转, 为高产奠定了良好基础。

4 结论

与常规分次施氮相比较, 采用一次性施肥的控释掺混肥不仅实现了夏玉米生产的轻简化, 而且在提高氮肥利用效率的同时, 在夏玉米上实现了增产增收。与 U100 相比, CBB100 和 CBB90 可增产 9.41%

和4.41%，CBB80不减产，控释掺混肥氮肥利用率提高4.8~8.5个百分点，CBB100经济效益最高。综合来看，CBB100控释掺混肥的施氮方案效果最佳。

参考文献:

- [1] Bortoletto-Santos R, Cavigelli M A, Montes S E, et al. Oil-based polyurethane-coated urea reduces nitrous oxide emissions in a corn field in a Maryland loamy sand soil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119329.
- [2] Mariano E, de Sant Ana Filho C R, Bortoletto-Santos R, et al. Ammonia losses following surface application of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers and urea [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 203: 242-251.
- [3] 石宁, 李彦, 张英鹏, 等. 控释肥对小麦/玉米农田土壤硝态氮累积和迁移的影响 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3920-3927.
- [4] 丁武汉, 谢海宽, 徐驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1097-1109.
- [5] Chen J, Lü S, Zhang Z, et al. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613: 829-839.
- [6] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3827-3839.
- [7] 曹兵, 徐秋明, 任军, 等. 延迟释放型包衣尿素对水稻生长和氮素吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 352-356.
- [8] 中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴* [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [9] Ning T Y, Shao G Q, Li Z J, et al. Effects of urea types and irrigation on crop uptake, soil residual, and loss of nitrogen in maize field on the North China Plain [J]. *Plant Soil and Environment*, 2012, 58: 1-8.
- [10] 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.
- [11] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 104-112.
- [12] Zheng W K, Sui C L, Liu Z G, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems [J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108: 1703-1716.
- [13] Xia L, Lam S K, Chen D, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [14] Yang L, Zhao H W, Liu J H. Effects of different nitrogen application on GS activity and yield in different quality spring maize varieties [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(3): 320-324.
- [15] 金容, 郭萍, 周芳, 等. 控释氮肥比例对玉米氮代谢关键酶活性及干物质积累的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(6): 729-736.
- [16] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 167-177.
- [17] 张莉, 熊波, 卢闯, 等. 包膜尿素与普通尿素掺混施用方式对土壤脲酶及春玉米生长的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1): 40-44.
- [18] 中国土壤学会农业化学专业委员会. *土壤农业化学常规分析方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [19] Trenkle M E. Slow- and controlled release and stabilized fertilizers [M]. Paris: Int. Fertilizer Industry Assoc., 2010.
- [20] Fujisawa E, Hanyu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods. 7. Simulation of nutrient release from coated fertilizers as influenced by soil moisture [J]. *Japanese Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 2000, 71(6): 607-614.
- [21] 衣文平, 史桂芳, 武良, 等. 不同释放期包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用效果研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 931-937.
- [22] 史桂芳, 董浩, 衣文平, 等. 不同用量长效控释肥对夏玉米生长发育及产量的影响 [J]. *山东农业科学*, 2017, 49(7): 95-98.
- [23] Zhang S, Shen T, Yang Y, et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 191-197.
- [24] 衣文平, 朱国梁, 武良, 等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1497-1502.
- [25] Xu C M, Wang D Y, Chen S, et al. Effects of aeration on root physiology and nitrogen metabolism in rice [J]. *Rice Science*, 2013, 20(2): 148-153.
- [26] 吴雅薇, 李强, 豆攀, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种生育后期叶绿素含量和氮代谢酶活性的影响 [J]. *草业学报*, 2017, 26(10): 191-200.
- [27] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1591-1598.
- [28] 金容, 李兰, 郭萍, 等. 控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 214-221.
- [29] 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.

Impact of controlled release blended fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and leaf enzyme activity of nitrogen metabolism of summer maize under single basal reduction application

CAO Bing^{1, 2}, HUANG Zhi-hao³, WU Guang-li³, LIANG Hong-sheng⁴, CHEN Yan-hua^{1, 2}, ZUO Qiang^{1, 2}, NI Xiao-hui^{1, 2}, ZOU Guo-yuan^{1, 2}, WANG Xue-xia^{1, 2*} (1. Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Science, Beijing 100097; 2. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow/Controlled-Release Fertilizer, Beijing 100097; 3. Hebei Monband Water Soluble Fertilizer Co. Ltd., Hebei Province, Shijiazhuang Hebei 050000; 4. College of Life Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010011)

Abstract: The effects of single basal application of controlled release blended fertilizer on the yield, nitrogen use efficiency and leaf enzyme activities of summer maize were explored to provide technical support for reducing fertilizer application and increasing efficiency. A field experiment was carried out on the summer maize variety “mingkeyu 77”. No nitrogen (CK), conventional nitrogen (U100) and 3 controlled release blended fertilizer levels (CBB100, CBB90 and CBB80, which denotes 0, 10% and 20% reduction of N rate based on U100, respectively) were employed in this experiment. The yield of summer maize, nitrogen use efficiency, key enzyme activities of leaves nitrogen metabolism, economic benefits and soil inorganic nitrogen dynamics were analyzed and investigated. The results showed that the release of controlled release nitrogen in the field was mainly concentrated in the early and middle period of summer maize, and the cumulative release rate of nitrogen was 56.2% and 86.2%, respectively, at jointing and harvesting. Compared with U100, the yield of summer maize was increased by -2.64%, 4.41% and 9.41%, the agronomic utilization rate of nitrogen was increased by -0.03, 2.99 and 4.45 kg · kg⁻¹, the utilization rate of nitrogen was increased by 16.6% ~ 29.5%, the partial productivity of nitrogen fertilizer was increased by 4.45 ~ 10.25 kg · kg⁻¹, and net income per hectare (excluding fertilizer input) was increased by -108, 816 and 1442 yuan in CBB80, CBB90 and CBB100 treatment, respectively. The activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, glutamate synthetase and glutamate dehydrogenase in leaves of summer maize were significantly increased by nitrogen application. Compared with U100, the activities of leaves in CBB90 and CBB100 were increased, with significant difference in glutamine synthetase activities, but there was no significant difference in other parameters between nitrogen application treatments. According to the factors of summer maize yield, nitrogen utilization rate, economic benefit of fertilization and residual soil nitrogen, the effect of no nitrogen reduction by controlled-release blended fertilizer was the best.

Key words: summer maize; controlled release blended fertilizer; yield; nitrogen use efficiency; enzyme activity of nitrogen metabolism