

氮肥运筹方式对土壤无机氮变化、玉米产量和氮素吸收利用的影响

张 林, 武文明, 陈 欢, 陈洪俭, 彭 晨, 王世济*, 曹承富*

(安徽省农业科学院, 安徽 合肥 230001)

摘 要: 研究氮肥运筹方式对黄淮海南部砂姜黑土区夏玉米生育期间土壤无机氮含量、玉米氮素积累与转运、产量和氮素利用效率的影响, 为该地区玉米合理施肥, 实现增产增效和轻简化生产提供科学依据。试验于 2018 年在安徽省蒙城县农业科技示范场进行, 以庐玉 9105 为材料, 共设置 6 个处理, 分别为不施氮肥 (T1)、常规氮肥一次性基施 (T2)、常规氮肥 50% 基施 +50% 拔节期追施 (T3)、常规氮肥 50% 基施 +50% 大喇叭口期追施 (T4)、50% 常规氮肥 +50% 控失肥一次性基施 (T5)、控失肥减氮 25% 一次性基施 (T6)。T2 ~ T5 氮施用量为 262.50 kg/hm², T6 为 195.00 kg/hm²。系统分析了玉米生育期间 0 ~ 40 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮含量动态变化、玉米开花期和成熟期干物质及氮素积累量, 玉米产量、氮素转运、氮肥利用效率及经济效益。结果表明, 不同氮肥运筹方式对玉米产量、穗粒数、千粒重及氮肥利用效率有显著影响, 常规氮肥一次性基施 T2 低产低效。拔节期或大喇叭口期追施氮肥通过补充玉米生长中后期土壤硝态氮和铵态氮含量, 促进了玉米花后氮素积累, 减少花前氮素转运, 玉米产量、氮肥利用效率 (NUE)、吸收效率 (NUPE)、农学利用率 (NAE) 和偏生产力 (NPFP) 比 T2 分别增加 6.89% ~ 11.11%、18.84% ~ 24.48%、7.15% ~ 9.29%、23.49% ~ 37.88% 和 6.89% ~ 11.11%。T5 处理玉米开花后 0 ~ 40 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮高于 T2, 其有利于耕层土壤氮素持续有效供应, 增加花后干物质和氮素积累量, 花前氮素转运率和转运对籽粒贡献率比 T2 分别显著减少 11.58% 和 22.16%, 玉米产量、NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 分别达到 9535.15 kg/hm²、36.01%、0.82 kg/kg、14.00 kg/kg 和 36.32 kg/kg, 比 T2 分别显著增加 15.00%、27.88%、10.59%、51.14% 和 15.00%; 其效果优于常规氮肥两次施用, 经济效益比常规氮肥两次施用增加 706.94 ~ 1302.08 元/hm²。T6 与 T2 玉米产量、效益相当, 但 NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 分别显著增加 41.96%、37.41%、38.44% 和 35.74%, 达到氮肥高效, 减少环境污染的目的。因此, 在黄淮海南部砂姜黑土区, 50% 常规氮肥与 50% 控失肥配施, 能增产增效, 实现一次性施肥轻简化生产。

关键词: 玉米; 控失肥; 一次性施肥; 产量; 氮素转运; 氮素利用效率

玉米对氮肥敏感, 生育期间对氮肥需求量大, 施用氮肥是促进玉米增产的重要措施^[1-2]。但长期不合理施用氮肥, 不仅不利于玉米高产, 还会降低氮肥利用率, 华北平原玉米氮肥利用率仅 26% ~ 31%^[3], 同时造成资源浪费和环境污染, 特别是土壤无机氮的淋失, 成为水体和大气污染的

重要来源, 严重影响了生态环境^[4]。因此, 在保证产量和品质的同时, 优化氮肥管理对于保障粮食安全, 提高氮肥利用率, 减轻环境污染都具有重要意义^[5]。

黄淮海南部是安徽省粮食主产区, 是典型的小麦 / 玉米轮作种植区。玉米常规施用传统复合肥和尿素, 其活性高, 损失途径多^[6]。施肥方式为基施复合肥并追施尿素, 其追肥多为降雨前后人工撒施。玉米生育期内, 雨量充沛, 时空不均, 旱涝易发; 同时玉米植株高大, 后期追肥极为不便; 且在农村劳动力日益减少, 劳动成本提高的情况下, 分次施肥更为困难, 不利于农业精简化生产。甚至一些地区出现不追肥的现象, 导致玉米不同程度减产。缓 / 控释肥因具有养分释放与作物吸收同步的

收稿日期: 2020-05-15; 录用日期: 2020-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0300901, 2017YFD0301307); 安徽省农业科学院创新团队项目。

作者简介: 张林 (1982-), 男, 安徽凤阳人, 副研究员, 博士, 主要从事玉米栽培生理与抗逆栽培研究。E-mail: zhanglin00@163.com。

通讯作者: 王世济, E-mail: wangshijiyi@163.com; 曹承富, E-mail: caocfu@126.com。

特点, 成为一次性施肥中的重要技术环节^[7-8]。研究表明与常规氮肥相比, 缓/控释肥可以提高玉米生育中后期土壤无机氮尤其是硝态氮含量^[9], 提高玉米产量和氮肥利用效率^[10-11]。缓/控释肥保水能力差, 释放到土壤中未被植物吸收利用的养分在遇到强降雨时仍有淋失的风险^[12]。控失肥是国内新一代缓/控释肥料, 其施入土壤遇水后, 控失剂自组织成微纳尺度的“互穿网络”结构, “网捕”肥料有效养分, “放大”肥料分子空间尺度而团聚于土壤耕作层中, 降低水分子以及溶解在水中的肥料分子的迁移率和挥发性, 改变了肥料的溶解特性及主动释放性, 具有固定养分、控制流失的特点^[13-14]。白珊珊等^[15]研究发现, 在环渤海低平原区 N 和 P_2O_5 施肥量同常规施肥量基本一致, 仅灌一次底墒水或无灌水条件下, 控失肥能提高冬小麦产量 17% ~ 29%、氮肥农学效率 71% ~ 228%、肥料贡献率 53%。相对于普通肥料, 控失肥能显著增加玉米产量 6.9% 和偏生产力 39%^[16]。此外, 在控失型复合肥较普通复合肥减氮 28% 的情况下, 产量几乎相当, 但氮肥农学利用率提高 36.6%^[17]。可见, 不同的氮肥运筹方式对作物产量和氮肥利用效率均有显著影响。

目前针对黄淮海夏玉米区不同施肥方式对玉米产量及氮肥效应的研究虽有一定报道^[7, 18-20],

但黄淮海南部砂姜黑土区尚缺乏对玉米氮肥运筹方式的系统研究, 特别是控失肥对玉米氮素积累、转移和产量等的影响。为此, 本研究结合黄淮海南部冬小麦/夏玉米典型轮作区玉米生产中施肥情况, 通过田间试验, 探讨不同施肥措施对玉米植株氮素累积与转移、玉米产量及土壤无机氮动态的影响, 以期为黄淮海南部夏玉米区合理施肥, 实现轻简化栽培, 减少农业面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在安徽省蒙城县农业科技示范场 (33° 9' 44" N, 116° 32' 56" E) 进行, 该区位于黄淮海平原南部, 属暖温带半湿润季风气候, 光热资源丰富。2018 年玉米生育期内降雨量为 538.1 mm, 平均气温为 26.69 °C, 总日照时长为 718.4 h (图 1)。

土壤类型为砂姜黑土, 施肥前 0 ~ 20 cm 土层土壤基本性状为: 有机质含量 18.60 g/kg, 铵态氮含量 11.86 mg/kg, 硝态氮含量 8.42 mg/kg, 有效磷含量 35.40 mg/kg, 速效钾含量 169.60 mg/kg。20 ~ 40 cm 土层土壤铵态氮含量 4.91 mg/kg, 硝态氮含量 4.55 mg/kg。

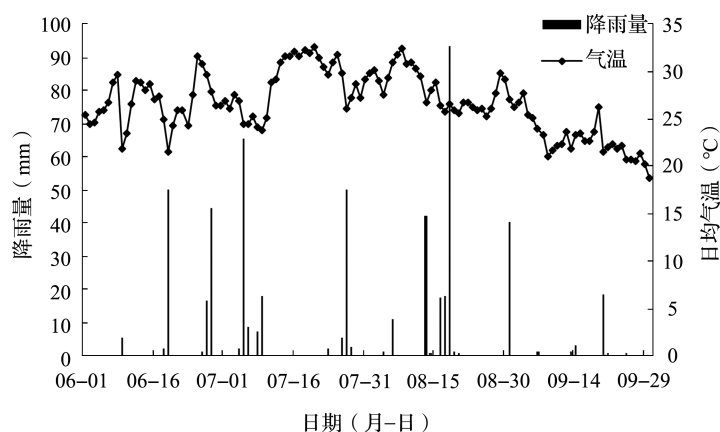


图 1 玉米生育期内降雨量和日均气温

1.2 试验设计

试验采用单因素设计, 按不同氮肥运筹方式设 6 个处理, 见表 1。T2 ~ T4 处理施用的氮肥为常规氮肥 (常规 NPK 复合肥 600 kg/hm² + 尿素 375 kg/hm²); T5 处理的氮肥为 50% 常规氮肥配施 50% 控失肥 (常规 NPK 复合肥 300 kg/hm² + 尿素 187.5

kg/hm² + 控失复合肥 504.75 kg/hm²); T6 处理的施氮量减少 25%, 施用控失肥 750 kg/hm²。各处理 P_2O_5 、 K_2O 不足部分分别由过磷酸钙、硫酸钾提供。试验中常规 NPK 复合肥 (N- P_2O_5 - K_2O =15-15-15) 由安徽司尔特肥业股份有限公司生产; 控失复合肥 (N- P_2O_5 - K_2O =26-7-10) 为网捕式, 由中国科学院

合肥物质科学研究院研制, 安徽瑞虎肥业有限公司生产; 尿素为普通尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 12%), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%)。每处理 3 次重复, 共 18 个小区, 小区面积 36 m^2 , 随机区组排列。

试验中前茬小麦秸秆粉碎全量还田, 玉米基肥

撒施后旋耕。玉米品种为庐玉 9105。2018 年 6 月 5 日播种, 播种密度为 75000 株/hm^2 , 行距 0.6 m, 播种后灌溉。T3、T4 处理分别在玉米拔节期 (7 月 5 日)、大喇叭口期 (7 月 20 日) 追施尿素, 均采用沟施覆土方法追施。9 月 30 日收获, 其他田间管理按大田常规方法进行。

表 1 试验处理及肥料用量

处理	施肥量 (kg/hm^2)			施肥方式
	N	P_2O_5	K_2O	
T1	0	90.00	95.55	一次性基施
T2	262.50	90.00	95.55	常规氮肥, 全部肥料一次性基施
T3	262.50	90.00	95.55	常规氮肥, 总 N 量 50% 的尿素在拔节期追施, 其余肥料一次性基施
T4	262.50	90.00	95.55	常规氮肥, 总 N 量 50% 的尿素在大喇叭口期追施, 其余肥料一次性基施
T5	262.50	90.00	95.55	50% 常规氮肥配施 50% 控失肥, 全部肥料一次性基施
T6	195.00	90.00	95.55	控失肥, 一次性基施

1.3 测试项目与方法

分别于玉米拔节期 (7 月 5 日)、大喇叭口期 (7 月 20 日)、开花期 (8 月 4 日)、灌浆中期 (9 月 3 日) 和成熟期 (9 月 31 日) 取 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层土样, 其中拔节期和大喇叭口期土壤样品采集在追肥前进行, 每小区随机取 5 点。鲜土过 2 mm 筛后, 混合均匀称取 5 g 土壤样品, 加入 2 mol/L KCl 溶液 (土液比 1 : 10) 振荡 30 min 浸提, 采用全自动流动分析仪 (AA3 SEAL Analytical, 德国) 测试土壤硝态氮和铵态氮含量, 同时烘干法测定土壤含水量。

在玉米开花期和成熟期采集玉米植株样品, 每小区采取具有代表性玉米植株 3 株, 按叶片、茎鞘、营养体和籽粒 (成熟期) 等部位分开, 105°C 杀青 0.5 h, 然后 75°C 烘干至恒重。称量质量并计算干物质积累量。植株样品粉碎过 2 mm 筛, 用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 然后用全自动流动分析仪 (AA3 SEAL Analytical, 德国) 测试样品氮含量。

玉米完熟后, 调查每小区玉米有效穗数。每小区连续取 20 株玉米果穗风干后考种, 计数穗行数、行粒数和穗粒数。在每小区籽粒中选取均匀一致的玉米籽粒 1000 粒, 放入烘箱烘至恒重并称量质量, 然后转换成含水量 13% 的质量为玉米千粒重。收获时每小区收取有代表性 2 行玉米果穗, 脱粒后风干称重, 同时转换成含水量 13% 的质量, 根据面积计算玉米产量。

1.4 计算方法与数据统计分析

参考 Zhang 等^[20] 和赵斌等^[21] 的方法计算参数:

氮素转运量 ($\text{NT}, \text{kg/hm}^2$) = 开花期植株氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量;

氮素转运率 ($\text{NTR}, \%$) = 氮素转运量 / 开花期植株氮素积累量 $\times 100$;

氮素转运对籽粒的贡献率 ($\text{GCR}, \%$) = 氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100$;

氮收获指数 ($\text{NHI}, \%$) = 玉米籽粒中氮积累量 / 植株氮积累总量 $\times 100$;

氮肥利用率 ($\text{NUE}, \%$) = (成熟期施氮区植株氮素积累量 - 不施氮区氮素积累量) / 施氮量 $\times 100$;

氮肥吸收效率 ($\text{NUPE}, \text{kg/kg}$) = 成熟期植株氮素积累量 / 施氮量;

氮肥农学利用率 ($\text{NAE}, \text{kg/kg}$) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量;

氮肥偏生产力 ($\text{NPFP}, \text{kg/kg}$) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量。

采用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著极差法 (LSD), 在 5% 水平上对不同处理结果进行差异显著性检验, 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 表中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$), 图中为平均值 $\pm$ 标准误 ($n=3$)。数据分析和作图利用 SPSS 18.0 和 Excel 2010 进行。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥运筹下玉米生长季土壤铵态氮和硝态氮动态变化

与T1相比,施用氮肥显著提高了0~40 cm土层土壤铵态氮和硝态氮含量,但不同生育期各土层含量随施氮方式不同存在差异(图2)。拔节期(播种后30 d)0~40 cm土层土壤铵态氮含量T2高于T5,两者显著高于其他处理。T3和T4处理追施尿素后,T3拔节期至大喇叭口期和T4大喇叭口期至开花期土壤铵态氮及硝态氮含量升高。大喇叭

口期(播种后第45 d)0~40 cm土层土壤铵态氮含量T2、T3和T5处理显著高于T4、T6和T1。开花期(播种后60 d)0~20 cm土层土壤铵态氮含量T4处理最高,T3和T5处理显著高于T2、T6和T1;20~40 cm土层规律类似。灌浆中期(播种后90 d)铵态氮含量明显降低,T5处理0~20 cm土层最高,之后依次是T4、T3、T2、T6和T1,其中T5显著高于后四者,T4显著高于后三者;各处理20~40 cm土层铵态氮含量差异不显著。成熟期(播种后118 d)各施氮处理0~40 cm土层土壤铵态氮含量差异不显著。

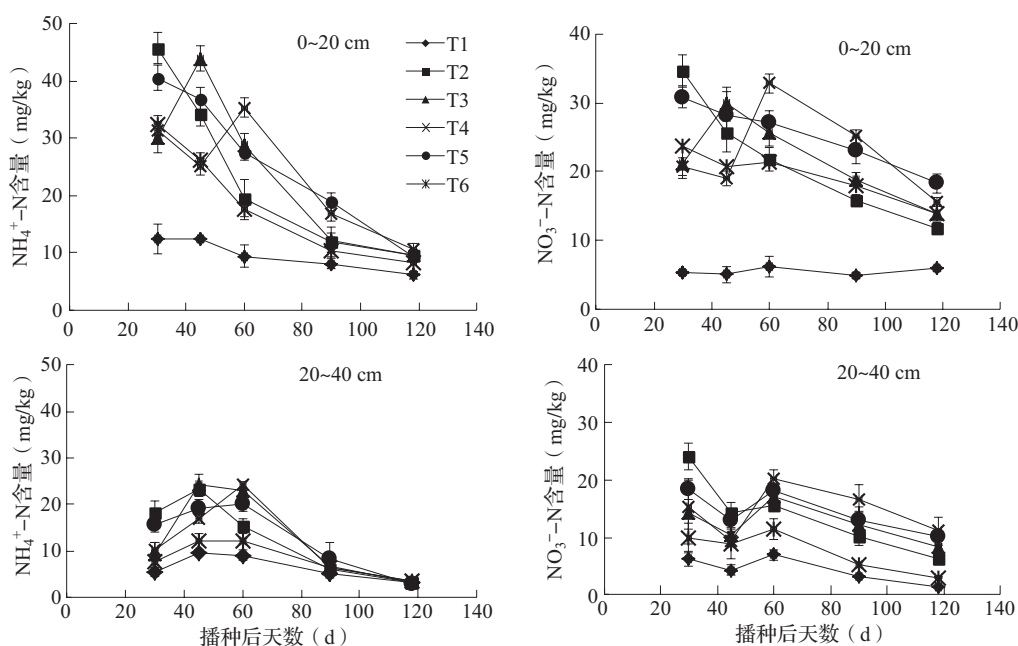


图2 不同施肥处理0~40 cm土壤无机氮含量动态变化

拔节期0~40 cm土层土壤硝态氮含量与铵态氮规律相同(图2)。大喇叭口期0~20 cm土层硝态氮含量T3处理最高,其次为T5,两者显著高于T1、T4和T6处理;20~40 cm土层处理间差异减小。开花期0~20 cm土层土壤硝态氮含量T4处理最高,其次为T5,两者显著高于T6、T2和T1;20~40 cm土层规律类似。灌浆中期0~20 cm土层硝态氮含量T4和T5显著高于其他处理,20~40 cm土层T4显著高于T2、T6和T1。成熟期0~20 cm土层土壤硝态氮含量T5处理最高,之后依次是T4、T3、T6、T2和T1,T5显著高于后四者;20~40 cm土层各处理依次为T4、T5、T3、T2、T6和T1。可见,常规氮肥一次

性基施在玉米拔节期前0~40 cm土层硝态氮和铵态氮含量最高,但开花期后低于T3、T4和T5处理。

2.2 不同氮肥运筹对玉米产量及其构成的影响

氮肥运筹方式对玉米籽粒产量、穗粒数和千粒重影响显著(表2)。相对于T1处理,施氮显著增加玉米产量41.51%~62.74%。T3和T4处理间产量差异不显著,比T2处理增产6.89%~11.11%,其中与T4处理达到显著水平。T5处理产量最高,比T2、T3和T4分别增产15.00%($P<0.05$)、7.59%和3.50%。T6与T2处理的产量差异不显著。可见,与等量常规氮肥一次性基施相比,追施氮肥及配施50%氮的控失肥一次性基施能增加玉米产量。

表 2 不同施肥处理玉米产量及其构成

处理	籽粒产量 (kg/hm ²)	穗数 (穗/hm ²)	穗粒数	千粒重 (g)
T1	5859.28 ± 382.97c	72855.33 ± 1614.74a	402.64 ± 12.33d	261.23 ± 2.07c
T2	8291.44 ± 498.25b	73689.00 ± 1804.81a	504.24 ± 32.10bc	273.42 ± 7.33b
T3	8862.62 ± 415.80ab	73760.67 ± 603.40a	520.15 ± 13.57abc	280.48 ± 3.15ab
T4	9212.71 ± 523.18a	74372.33 ± 1306.18a	535.52 ± 18.10ab	283.00 ± 2.15ab
T5	9535.15 ± 633.27a	73690.00 ± 1468.57a	542.57 ± 7.68a	284.25 ± 4.87a
T6	8360.53 ± 97.72b	73835.00 ± 659.72a	500.94 ± 16.59c	276.80 ± 10.86ab

注：表中数据的小写字母不同表示处理间差异显著。下同。

T5 处理穗粒数最多，其次为 T4，T5 显著高于 T2、T6 和 T1；处理 T2、T3 和 T6 间差异不显著。T5 处理千粒重最大，显著高于 T2 和 T1；处理 T2、T3、T4 和 T6 间差异不显著。

2.3 不同氮肥运筹对玉米物质积累与氮素转运的影响

T1 处理玉米植株干物质和氮素积累量最低，施氮后显著增加（表 3）。开花期 T4 处理干物质积累量最高，比 T2 显著增加 15.27%；成熟期 T5 最高，其次为 T4，比 T2 分别显著增加 11.03% 和 8.61%；T3、T4 和 T5 间差异不显著。T6 开花期干物质积累量显著低于 T3、T4 和 T5 处理，成熟期

T6 与 T2、T3 及 T4 差异不显著。开花期 T2、T3、T4 和 T5 处理氮积累量差异不显著，四者显著高于 T6。成熟期 T5 处理氮积累量最高，其次为 T4 处理，比 T2 分别显著增加 10.59% 和 9.29%；T3 和 T6 与 T2 处理差异不显著。

T2 处理花前氮素转运量最多，显著高于 T5、T6 和 T1 处理（表 3）。T5 处理氮转运率（NTR）最低，显著低于 T1、T2 和 T3。T5 和 T6 处理转运对籽粒氮的贡献率（GCR）显著低于 T1 和 T2。T2、T3 和 T4 处理间 NTR 和 GCR 差异不显著，但随氮肥后移，有降低趋势。说明控失肥一次性基施能增加花后植株氮素积累，减少花前氮素转运。

表 3 不同施肥处理玉米干物质和氮素积累量及氮素转运特征

处理	干物质积累量 (kg/hm ²)		氮素积累量 (kg/hm ²)		氮素转运量 (kg/hm ²)	氮转运率 (%)	转运对籽粒氮贡献率 (%)
	开花期	成熟期	开花期	成熟期			
T1	5522.75 ± 597.46d	12888.00 ± 1438.14d	64.17 ± 6.32c	120.73 ± 15.74d	31.97 ± 1.81d	54.69 ± 1.68a	36.92 ± 7.53a
T2	7750.75 ± 445.60bc	21410.00 ± 876.17c	103.12 ± 5.80a	194.66 ± 7.76c	45.00 ± 3.97a	50.50 ± 0.46ab	33.02 ± 3.55ab
T3	8529.25 ± 641.97ab	22539.00 ± 683.27abc	108.28 ± 8.31a	208.59 ± 4.48abc	44.35 ± 2.53ab	49.34 ± 0.78b	30.78 ± 3.41abc
T4	8934.50 ± 409.66a	23254.25 ± 1028.82ab	105.08 ± 2.20a	212.75 ± 8.37ab	42.53 ± 3.22ab	47.02 ± 4.23bc	28.34 ± 2.31bc
T5	8559.75 ± 544.95ab	23772.50 ± 916.51a	103.26 ± 5.08a	215.27 ± 1.98a	38.72 ± 3.08bc	44.65 ± 1.75c	25.70 ± 2.24c
T6	7604.75 ± 366.51c	21607.75 ± 993.65bc	90.22 ± 7.67b	198.70 ± 10.52bc	36.12 ± 5.07cd	46.42 ± 3.39bc	25.08 ± 4.17c

2.4 不同氮肥运筹对氮素利用效率的影响

氮肥运筹方式对玉米氮收获指数（NHI）影响不显著（表 4），但对氮肥利用率（NUE）、氮肥吸收效率（NUPE）、氮肥农学利用率（NAE）和氮肥偏生产力（NPFP）有显著影响。T6 的 NUE、NUPE 和 NPFP 最高，其中 NUE 显著高于 T2 和 T3，NUPE 和 NPFP 显著高于其他施氮处理。T5 处理的 NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 比 T2 分别显著增加 27.88%、10.59%、51.14% 和 15.00%，T4 处理的 NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 比 T2 分别显著增加 24.48%、9.29%、37.88% 和 11.11%，T3、T4

和 T5 间差异不显著。可见，相对于常规肥料一次性基施，追施氮肥能提高氮肥利用率、吸收效率、农学效率和偏生产力，其中在大喇叭口期追施效果显著；配施 50% 氮的控失肥和控失肥减氮 25% 一次性基施，能显著提高氮肥利用率、吸收效率、农学效率和偏生产力。

2.5 不同氮肥运筹方式经济效益分析

不同处理经济效益分析如表 5 所示，追施氮肥的 T3 和 T4 处理以及控失肥一次性基施的 T5 和 T6 处理玉米产值较 T2 均不同程度增加，其中以 T5 处理最高。T5 处理肥料成本最高，但省去了追肥劳

动力成本，其收益亦最高，较 T2、T3 和 T4 处理分别增加 1823.10、1302.08 和 706.94 元/hm²。此外，T6 与 T2 处理效益相当。说明配施 50% 氮的控失肥一次性基施，可增加农民纯收入。

表 4 不同施肥对氮肥利用效率的影响

处理	氮收获指数 (%)	氮肥利用率 (%)	氮肥吸收效率 (kg/kg)	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
T1	68.63 ± 0.82a	—	—	—	—
T2	68.62 ± 1.53a	28.16 ± 2.96c	0.74 ± 0.03c	9.27 ± 1.90b	31.59 ± 1.90c
T3	69.06 ± 0.24a	33.46 ± 1.71bc	0.79 ± 0.02bc	11.44 ± 1.58ab	33.76 ± 1.58bc
T4	69.41 ± 1.30a	35.05 ± 3.19ab	0.81 ± 0.03b	12.77 ± 1.99a	35.10 ± 1.99b
T5	69.55 ± 0.21a	36.01 ± 0.75ab	0.82 ± 0.01b	14.00 ± 2.41a	36.32 ± 2.41b
T6	69.91 ± 1.86a	39.97 ± 5.40a	1.02 ± 0.05a	12.83 ± 0.50a	42.87 ± 0.50a

表 5 不同氮肥运筹方式经济效益 (元/hm²)

处理	产值	成本					效益
		种子农药	肥料	机械	人工	合计	
T1	9960.78	1200	1098.30	2250	2250	6798.30	3162.48
T2	14095.44	1200	2020.80	2250	2250	7720.80	6374.64
T3	15066.46	1200	2020.80	2250	2700	8170.80	6895.66
T4	15661.60	1200	2020.80	2250	2700	8170.80	7490.80
T5	16209.76	1200	2312.02	2250	2250	8012.02	8197.74
T6	14212.90	1200	2157.05	2250	2250	7857.05	6355.85

注：玉米价格按 1.70 元/kg 计，常规 NPK 复合肥、控失复合肥和尿素分别按 2000、2500 和 2100 元/t 计，追肥劳动力价格按 450 元/hm² 计（只有 T3 和 T4 追肥用工）。成本核算不包含土地成本。

3 讨论

3.1 常规氮肥基施需要追肥，50% 常规氮肥 +50% 控失氮肥一次性基施能增产增效

夏玉米各生育阶段对氮素需求不同，合理的氮肥运筹不仅要满足玉米各生育阶段的生长需求，促进氮素吸收、提高产量，还要提高氮肥利用效率和农学效率。本研究中 50% 氮追施（T3 和 T4）相比于常规氮肥一次性基施（T2），增加干物质和氮素积累量（表 3）、产量（表 2）及经济效益（表 5），提高氮肥利用效率、吸收效率、农学利用率和偏生产力（表 4），其中大喇叭口期追肥达到显著水平。与之前的研究结果一致^[20, 22]。玉米生育期对氮素的吸收符合“S 型”曲线^[23]，苗期作物根系没有完全形成，吸收氮素能力差^[24]；从营养器官建成后开始对氮素需求能力迅速增强，在抽雄前后达到最大值^[25]。常规氮肥作基肥，其氮素主要在拔节至大喇叭口期发挥作用^[26]，后期氮素供应不足，灌浆速率降低^[27]，低产低效。王

火焰等^[28]研究指出，肥料养分的低效是由于常规施肥措施下，土壤中肥料养分的供应空间、时间、浓度和用量无法与作物需求匹配。但是分次施用氮肥能促进作物氮素需求与氮素供应相匹配，提高氮素利用效率^[29]。在拔节期或大喇叭口期追施氮肥较好满足玉米生育中后期氮素吸收，增强叶片光合作用，增加花后干物质积累并向籽粒转运，进而增加产量和氮素利用效率。因此常规氮肥基施，需要根据拔节期至大喇叭口期降水等天气情况，追施一定比例的氮，满足穗粒数和粒重形成期氮素营养供应。

控失肥作基肥时，肥效释放缓慢，将更多的养分保持在根系分布层，供肥能力持久，控制肥料的流失，遭遇强降雨时比控释肥养分流失少^[30]。此外，控失肥能提高植株根系活力^[31]，有利于根系从土壤中吸收较多的水分和养分。本研究结果表明，50% 常规氮肥与 50% 控失氮肥配合一次性基施（T5）与 T2 相比能促进玉米氮素吸收，显著增产 15.00%（表 2），NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 分

别显著增加 27.88%、10.59%、51.14% 和 15.00% (表 4); 其对玉米产量和氮肥利用效率的增幅高于 T3 和 T4, 效果优于常规肥料基追两次施用。与黄淮海地区 100% 控释肥一次性基施增产效果相当^[19]。其原因可能是控失肥持久均衡的养分供应, 能够满足玉米后期的氮素需求。玉米吐丝期到完熟期一直保持较高的光合势, 延缓叶片衰老进程^[31], 最终增加产量和氮肥利用效率。虽然 T5 处理肥料成本最高, 但省去了追肥劳动力成本, 其收益最高, 较 T2、T3 和 T4 处理分别增加 1823.10、1302.08 和 706.94 元/hm² (表 5)。此外, 本研究在控失肥减氮 25% 的条件下 (T6), 玉米产量、效益与 T2 相当, 但 NUE、NUPE、NAE 和 NPFP 分别显著增加 41.96%、37.41%、38.44% 和 35.74% (表 4), 且 NUPE 和 NPFP 显著高于 T3 和 T4。符合同等产量条件下控失肥施用量应该减少的研究结果^[13]。说明在 262.50 kg/hm² 施氮量下, 50% 常规氮肥与 50% 控失氮肥结合一次性基施, 养分释放可以满足玉米全生育期需求, 节约追肥劳动力成本, 实现轻简化生产, 同时增加经济效益。控失肥减氮 25% 一次性基施不影响玉米籽粒的建成, 却能提高氮肥利用效率, 减少对环境的污染。

3.2 控失肥基施增加花后氮素积累, 减少花前氮素转运

玉米籽粒产量是由生育期内干物质及养分的积累、分配和转运所决定的, 很大程度上取决于生育后期的光合能力。玉米开花至成熟阶段是玉米氮素吸收与转运的关键时期^[32], 花后氮素积累对作物产量影响显著^[33]。本研究发现, 同等施氮量下各处理开花期玉米氮素积累量差异不显著 (表 3), 但成熟期 T2 显著低于 T4 和 T5, T5 花前氮素转运率和氮素转运对籽粒贡献率比 T2 分别显著减少 11.58% 和 22.16%。可见, 常规氮肥一次性基施, 花后氮素积累相对少, 加大了花前氮素的转运, 导致生育后期叶片衰老进程加快, 光合能力下降^[34], 限制产量的提高。而控失肥能保障玉米花后吸收较多的氮, 以保持叶片较高的光合速率, 为植株提供更多的光合产物, 进一步增强根系对养分和水分的吸收能力, 最终获得了更高的产量和氮肥利用效率。因此, 控失肥持久均衡的养分供应, 减少花前氮素转运, 延缓叶片衰老进程, 维持花后叶片较高的光合能力, 保证灌浆对养分的需求, 是实

现高产高效的生理基础。

3.3 控失肥基施能协调土壤氮素供应与玉米生长需氮的关系

土壤硝态氮和铵态氮作为植株吸收利用的主要氮素形式, 其丰缺程度可有效表征土壤供氮状况。不同施氮措施对土壤硝态氮和铵态氮有显著影响^[35], 而土壤氮素能否满足作物对养分的需求, 对作物产量有显著影响^[36]。本研究结果表明, 0 ~ 40 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮含量, 在玉米拔节期之前常规氮肥一次性基施处理最高; 在开花后常规氮肥配施控失肥处理高于常规肥料一次性基施, 控失肥减氮 25% 与常规肥料一次性基施差异不显著 (图 2)。其主要原因是常规氮肥氮素释放快, 使土壤无机氮含量在短期内快速增加, 不利于土壤氮素的长久固持^[37]; 此外, 本研究中玉米开花期之前降雨量达 284.6 mm, 大量氮素可能通过氨挥发、硝化-反硝化、淋洗或径流等各种途径损失^[38]。控失肥通过控制氮素释放和流失, 可使氮挥发减少 79%, 水体径流减少 52.6%, 土壤淋溶减少 51.9%^[13], 保证玉米生育中后期耕层土壤氮素持续有效供应。适当提高后期土壤氮素供应能力, 有利于提高氮肥利用率和降低土壤氮素的表观盈余量, 减轻氮肥施用对环境的污染^[39]。侯云鹏等^[36]指出玉米开花期至成熟期耕层土壤无机氮含量与玉米产量、氮素积累量和氮素利用效率均呈显著或极显著的正相关关系。可见, 在黄淮海南部砂姜黑土区, 控失肥能更好协调土壤氮素供应与玉米生长需氮的关系, 达到一次性施肥、增产增效和减少污染环境的优化氮肥管理目的。

4 结论

与等量常规氮肥一次性基施相比, 在玉米拔节期或大喇叭口期追施 50% 氮能增加玉米产量、氮素利用效率和农学效率, 两个追肥时期差异不显著。

常规氮肥与控失肥结合一次性基施能保持玉米生育阶段耕层土壤氮素均衡有效供应, 促进花后氮素吸收, 减少花前氮素转运, 通过增加玉米穗粒数和粒重提高玉米产量和经济效益, 同时提高氮肥利用率和农学效率; 其效果优化常规氮肥基追两次施用。控失肥减氮 25% 相比于常规氮肥一次性基施玉米产量相当, 但能提高氮肥利用率和农学效率。因此, 在黄淮海南部砂姜黑土区, 50% 常规氮肥与

50% 控失肥配施, 能增产增效, 实现一次性基施轻简化生产。

参考文献:

- [1] Abbasi M K, Tahir M M, Rahim N. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan [J]. *Geoderma*, 2013, 195–196 (1): 87–93.
- [2] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (3): 559–565.
- [3] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31 (2): 397–414.
- [4] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (6): 711–716.
- [5] Mosisa W, Marianne B, Gunda S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids [J]. *Crop Science*, 2007, 47 (2): 519–528.
- [6] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (1): 1–7.
- [7] 易镇邪, 王璞. 包膜复合肥对夏玉米产量、氮肥利用率与土壤速效氮的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (2): 242–247.
- [8] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41 (11): 3672–3678.
- [9] 李娜, 宁堂原, 崔正勇, 等. 深松与包膜尿素对玉米田土壤氮素转化及利用的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (18): 6129–6137.
- [10] 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氮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.
- [11] Li P F, Lu J W, Wang Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [12] Zhou L L, Cai D Q, He L L, et al. Fabrication of a high-performance fertilizer to control the loss of water and nutrient using micro/nano networks [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3 (4): 645–653.
- [13] 吴跃进, 杨惠成, 余增亮. “控失化肥”示范应用结果及机理研究综述 [J]. *安徽农学通报*, 2007, 13 (24): 22–24.
- [14] 季保德. 控失型复混肥的控失机理及增产效果 [J]. *磷肥与复肥*, 2009, 24 (2): 51–52.
- [15] 白珊珊, 万书勤, 康跃虎, 等. 不同控失肥对冬小麦产量和肥料农学效率的影响 [J]. *华北农学报*, 2017, 32 (1): 149–155.
- [16] 蒋迁, 李磊, 张凤路, 等. 控失肥对夏玉米产量及养分积累的影响 [J]. *河北农业科学*, 2016, 20 (6): 52–57.
- [17] 邱冠男, 吴跃进, 王永国, 等. 新型高效控失型复合肥对黄淮海地区小麦产量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26 (18): 186–191.
- [18] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3): 559–566.
- [19] 杨岩, 谭德水, 江丽华, 等. 黄淮海夏玉米一次性施肥技术效应研究 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (20): 3909–3919.
- [20] Zhang L, Liu H H, Sun J Q, et al. Seedling characteristics and grain yield of maize grown under straw retention affected by sowing irrigation and splitting nitrogen use [J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 22–31.
- [21] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响 [J]. *作物学报*, 2010, 36 (10): 1760–1768.
- [22] Wang S J, Luo S S, Li X S, et al. Effect of split application of nitrogen on nitrous oxide emissions from plastic mulching maize in the semiarid Loess Plateau [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 220: 21–27.
- [23] Overman A R, Scholtz III R V. Model for accumulation of dry matter and plant nutrients by corn [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1999, 30 (15–16): 2059–2081.
- [24] Liu X, Xu S S, Zhang J W, et al. Effect of continuous reduction of nitrogen application to a rice-wheat rotation system in the middle-lower Yangtze River region (2013–2015) [J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 348–356.
- [25] Abendroth L J, Elmore R W, Boyer M J, et al. Corn growth and development [C]. PMR 1009. Ames: Iowa State Univ. Ext., 2011.
- [26] 易镇邪, 王璞, 陶洪斌, 等. 氮肥基/追比对比华北平原夏玉米生长发育与水、氮利用的影响 II. 夏玉米氮素累积、转运与土壤无机氮动态 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (1): 86–90.
- [27] 吴中伟, 樊高琼, 王秀芳, 等. 不同氮肥用量及其生育期分配比例对四川丘陵区带状种植小麦氮素利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (6): 1338–1348.
- [28] 王火焰, 周健民. 根区施肥—提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施 [J]. *土壤*, 2013, 45 (5): 785–790.
- [29] Zhang Z J, Chu G, Liu L J, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 9–18.
- [30] 王小明, 谢迎新, 张亚楠, 等. 新型肥料施用对玉米季土壤硝态氮累积的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (5): 232–236.
- [31] 蒋迁, 李磊, 张凤路, 等. 控失肥与普通化肥对夏玉米养分积累与生长发育的影响 [J]. *华北农学报*, 2016, 31 (4): 199–205.

- [32] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响 [J]. 作物学报, 2013, 39 (8): 1478-1490.
- [33] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (5): 1157-1166.
- [34] 郑圣先, 聂军, 戴平安, 等. 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (2): 188-194.
- [35] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contribution to food production, impacts on environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63 (2-3): 117-127.
- [36] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (20): 3928-3940.
- [37] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氮挥发特性 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (11): 2943-2949.
- [38] He G, Wang Z H, Li F C, et al. Soil nitrate-N residue, loss and accumulation affected by soil surface management and precipitation in a winter wheat–summer fallow system on dryland [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 106 (1): 31-46.
- [39] 石祖梁, 李丹丹, 荆奇, 等. 氮肥运筹对稻茬冬小麦土壤无机氮时空分布及氮肥利用的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (9): 2434-2442.

Effect of nitrogen management on dynamic changes of soil inorganic nitrogen, yield, nitrogen uptake and utilization of maize

ZHANG Lin, WU Wen-ming, CHEN Huan, CHEN Hong-jian, PENG Chen, WANG Shi-ji*, CAO Cheng-fu* (Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei Anhui 230001)

Abstract: The field experiment was conducted to study the effects of nitrogen management on the dynamic changes of soil inorganic nitrogen, nitrogen uptake and translocation, yield and nitrogen use efficiency of summer maize in lime concretion black soil of the south of Huang-Huai-Hai region. The study aimed to provide scientific basis for rational fertilization of maize in this area, to increase production and efficiency, and to simplify production. The field experiment was conducted at the experimental station of Mengcheng Agricultural Scientific Institute, Anhui Province in 2018. The maize hybrid was Luyu9105 in this experiment. Six fertilization treatments were compared, including no nitrogen fertilizer (T1), one-off application of convention nitrogen fertilizer (T2), 1:1 split application of convention nitrogen fertilizer between base and topdressing at jointing stage (T3), 1:1 split application of convention nitrogen fertilizer between base and topdressing at big flare stage (T4), one-off application of convention and loss-control fertilizer (1:1, T5), one-off application of loss-control fertilizer with the amount of nitrogen input was 25% reduction. (T6). N at a rate of 262.50 kg/hm² was used in T2 ~ T5, and 195.00 kg/hm² in T6. The results showed that different nitrogen management significantly affected the grain yield and yield components, plant nitrogen uptake and accumulation, and nitrogen use efficiency. Topdressing of convention nitrogen increased NH₄⁺-N and NO₃⁻-N content at 0 ~ 40 cm layer soil from anthesis stage to maturing stage, and promoted nitrogen accumulation of maize, while decreased nitrogen translocation from vegetative organs to grain pre-anthesis than 100% basal fertilizer. T3 and T4 treatments increased maize yield, nitrogen use efficiency (NUE), nitrogen uptake efficiency (NUPE), agronomy efficiency (NAE) and partial factor productivity (NPFP) by 6.89% ~ 11.11%, 18.84% ~ 24.48%, 7.15% ~ 9.29%, 23.49% ~ 37.88% and 6.89% ~ 11.11%, respectively, compared to N2. NH₄⁺-N and NO₃⁻-N content at 0 ~ 40 cm layer soil in T5 treatment were significantly higher than that in T2 after anthesis stage, which could better match nitrogen supply with nitrogen requirement of maize growth. Thus, T5 treatment increased dry matter and nitrogen accumulation of maize after anthesis stage, and significantly decreased nitrogen translocation rate and contribution rate to grain pre-anthesis by 11.58% and 22.16%, respectively, compared to N2. Finally, Maize yield, NUE, NUPE, NAE and NPFP of T5 treatment were 9535.15 kg/hm², 36.01%, 0.82 kg/kg, 14.00 kg/kg, 36.32 kg/kg, respectively, which were significantly increased by 15.00%, 27.88%, 10.59%, 51.14% and 15.00% compared to N2. T5 treatment increased net income by 706.94 ~ 1302.08 yuan/hm² compared to T3 and T4 treatments. Loss-control nitrogen fertilizer decreased nitrogen by 25%, it did not affect the maize yield and economic benefit, but could improve NUE, NUPE, NAE and NPFP by 41.96%, 37.41%, 38.44% and 35.74%, respectively, compared to N2. In this way, reduced fertilization of loss-control fertilizer could enhance nitrogen efficiency and reduce environment pollution. In conclusion, the combination of convention and loss-control nitrogen fertilizer (1:1) could not only increase maize grain yield, economic and nitrogen efficiency, but also realize maize simplified production techniques of one-off application in lime concretion black soil of the south of Huang-Huai-Hai region.

Key words: *Zea mays*; loss-control fertilizer; one-off fertilization; yield; nitrogen translocation; nitrogen use efficiency