

稳定性氮肥减施对春玉米氮素吸收及土壤无机氮供应的影响

冯小杰¹, 战秀梅^{1,2*}, 王颖³, 赵蔚⁴, 王雪鑫¹, 李俊¹, 何天池¹,
陈坤¹, 彭靖¹, 韩晓日^{1,2}

(1 沈阳农业大学土地与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室, 辽宁沈阳 110866; 2 农业农村部东北玉米营养与施肥科学观测实验站, 辽宁沈阳 110866; 3 辽宁省绿色农业技术中心, 辽宁沈阳 110034;
4 盘锦现代农业发展中心, 辽宁盘锦 124000)

摘要:【目的】稳定性氮肥减量施用在玉米上表现出良好的稳产和增产效果, 但缺乏针对不同土壤和气候条件下春玉米生产的推荐施用量。为此, 我们在辽中、辽南地区春玉米上开展了稳定性氮肥一次性施用最佳用量试验。【方法】2017年在辽宁省沈阳市和海城市两地开展田间试验。供试稳定性氮肥中同时添加了脲酶抑制剂和硝化抑制剂。两个试验区均设置了不施氮处理(CK)、普通尿素常规施氮量(CK1)和普通尿素减氮10%对照(CK2)。沈阳试验区设置稳定性氮肥比其CK1(244 kg/hm²)分别减氮10%、15%、20% 3个处理(S1、S2、S3), 海城试验区设置比其CK1(217 kg/hm²)分别减氮10%、15% 2个处理(S1、S2)。采集玉米生长季内各生育时期的土壤样品和植株样品, 测定土壤无机氮含量和植株不同部位养分含量, 每个小区单独采收, 记录产量。【结果】与CK1相比, 稳定性氮肥能显著提高玉米产量($P < 0.05$), 且以减氮15%的S2处理肥效稳定, 沈阳试验较CK1增产、增收幅度分别为7.5%、1795元/hm², 较CK2增产、增收幅度分别为11.1%、2808元/hm²; 而海城试验产量与CK1没有显著区别, 收入减少184元/hm², 与CK2相比, 增产19.5%, 增收2685元/hm²。与CK1相比, 稳定性氮肥处理氮素表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力依次提高10.4%~12.4%、3.4%~6.2%和6.5%~10.8%; 与CK2相比, 分别提高10.2%~12.2%、3.3%~6.1%和3.3%~7.6%。与普通尿素相比, 施用稳定性氮肥显著提高了玉米生育中后期植株氮素吸收强度, 稳定性氮肥各处理氮素总积累量表现为S2 > S1 > S3 > CK1 > CK2。土壤无机氮含量主要在0—20、20—40 cm土层表现出较大差异, 总体上稳定性氮肥处理(S1、S2、S3)耕层土壤无机氮含量在玉米生育前期(苗期、拔节期)低于普通尿素处理(CK1、CK2), 在玉米生育中后期(大喇叭口期至成熟期)0—40 cm土层无机氮含量显著高于普通尿素处理, 但总体上无机氮含量在0—40 cm土层中变化幅度较普通尿素处理平缓。【结论】稳定性氮肥减施可以维持或提高土壤无机氮含量。在沈阳试验点, 稳定性尿素施氮量减少15%时, 玉米的产量和经济效益、氮素累积总量和氮素表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力等都最高; 而在海城试验点, 由于普通尿素投入量相对较低, 最佳稳定性尿素推荐量为减氮10%。

关键词: 稳定性氮肥; 土壤无机氮; 氮肥利用效率; 氮肥减施; 土壤氮素残留; 春玉米; 产量; 经济效益

Effects of stabilized nitrogen fertilizer reduction on nitrogen uptake of spring maize and inorganic nitrogen supply in soils

FENG Xiao-jie¹, ZHAN Xiu-mei^{1,2*}, WANG Ying³, ZHAO Wei⁴, WANG Xue-xin¹, LI Jun¹, HE Tian-chi¹,
CHEN Kun¹, PENG Jing¹, HAN Xiao-ri^{1,2}

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China; 2 Scientific Observation and Experiment Station for Nutrition and Fertilization of Maize in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China;
3 Liaoning Green Agricultural Technology Center, Shenyang 110034, China; 4 Panjin Morden Agriculture Development Center, Panjin, Liaoning 124000, China)

收稿日期: 2019-10-29 接受日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300303)。

联系方式: 冯小杰 E-mail: fengxiaojie920218@163.com; * 通信作者 战秀梅 E-mail: xiumeizhan@163.com

Abstract: [Objectives] Stabilized nitrogen fertilizers have showed acknowledged effects in yield increasing and nitrogen input reduction, but lack the targeted recommendation for different soil and climatic conditions. Therefore, we conducted experiment to propose the optimum rate of one-time application of stabilized nitrogen fertilizer in spring maize in central and southern Liaoning Province. **[Methods]** Field experiments were carried out in Shenyang and Haicheng of Liaoning Province in 2017. The experimental nitrogen fertilizers were urea containing urease inhibitor and nitrification inhibitor. The treatments in both sites included no-nitrogen control (CK), ordinary urea control (CK1) and 10% less urea control (CK2), stabilized urea in application rates of 10%, 15% and 20% less than its CK1 (N 244 kg/hm²) treatment in Shenyang (S1, S2 and S3), and stabilized urea in rates of 10% and 15% less than its CK1 (N 217 kg/hm²) in Haicheng (S1 and S2). Soil and plant samples were collected in the main growing season of maize, respectively. The biomass and yield were investigated and the content of soil inorganic N and the N contents in different parts of maize plant were measured. **[Results]** The treatments of stabilized fertilizer increased the maize yield significantly ($P < 0.05$), and S2 treatment showed the most stable and highest yield. The yield and income in S2 treatment were 7.5% and 1795 yuan/hm² more than those in CK1, and 11.1% and 2808 yuan/hm² more than those in CK2 in Shenyang. The yield in S2 in Haicheng site was not significantly different from that in CK1 and the income decreased by 184 yuan/hm², and the yield and income were increased by 19.5% and 2685 yuan/hm², compared with CK2. Compared with CK1, the nitrogen recovery efficiency (NRE), nitrogen agronomy efficiency (NAE) and nitrogen partial factor productivity (NFPF) of stabilized fertilizer treatments were increased by 10.4%–12.4%, 3.4%–6.2% and 6.5%–10.8%, and compared with CK2, the increases were 10.2%–12.2%, 3.3%–6.1% and 3.3%–7.6%. The stabilized urea significantly increased the N absorption intensity of maize in the middle and late growth stages. The total plant N accumulation intensity was in order of S2 > S1 > S3 > CK1 > CK2. The soil inorganic N contents (SIN) varied quite differently in 0–20 and 20–40 cm soil layers during the growing season. In the seedling and jointing stage of maize, the SIN contents of 0–20 cm layer in S1, S2 and S3 treatments were lower than those in CK1 and CK2, but from bell-mouthed stage to mature stage, the SIN contents of 0–40 cm soil layer were significantly higher. Generally the SIN content of the 0–40 cm soil layer in S1, S2 and S3 treatments varied less than that of ordinary urea treatment. **[Conclusions]** Stabilized nitrogen reduction can maintain or increase soil inorganic nitrogen content. At the experimental site in Shenyang, the maize yield and economic benefit, total N accumulation and agricultural efficiency of nitrogen fertilizer are all highest when using stabilized urea at 15% less rate, while At the experimental site in Haicheng, the optimum recommendation for stabilized urea is 10% less as the relatively low conventional urea application rate in the area.

Key words: stabilized nitrogen fertilizer; inorganic nitrogen; nitrogen use efficiency; nitrogen reduction; soil nitrogen residue; spring maize; yield; economic efficiency

东北春玉米区是我国最大的玉米主产区, 对我国粮食安全具有重要的地位和作用^[1]。目前, 随着土地集中流转和玉米规模化种植模式的发展, 玉米产量和生产成本成为重要的玉米种植效益衡量指标。由于从事农业生产的劳动力短缺, 农业用工的工资水平不断上涨, 为降低成本, 在东北平原地区一次性施肥现象十分普遍, 而速效氮肥一次性基施, 易造成作物生育前期氮素的大量损失以及生育后期脱氮^[2-3], 不但影响玉米产量和效益^[4], 也加剧了施肥对环境的污染程度^[5-9]。缓/控释氮肥的应用对解决这些问题提供了思路^[1, 10-11]。其中, 稳定性氮肥是一类新型肥料, 是在速效尿素中添加生化抑制剂进行改性

的肥料, 一次性基施可以减少劳动力的投入, 降低生产成本, 并且基本可以满足玉米整个生育期对氮素的需求, 达到稳定和提高产量、增加经济效益以及减少氨挥发和氮素向土壤深层淋失、提高氮肥利用效率的目的^[12-13]。因此, 在玉米产区明确稳定性氮肥合理施用量, 是协调作物稳产高产、氮肥高效利用和生态环境保护的一项可行性施肥措施。稳定性氮肥有 3 种类型, 分别为只添加脲酶抑制剂的稳定性氮肥 I 型、只添加硝化抑制剂的稳定性氮肥 II 型和同时添加两种抑制剂的稳定性氮肥 III 型^[14]。“十二五”期间, 稳定性氮肥已在我国 22 个省份的玉米、香蕉等 12 种作物上示范推广, 肥料产品达 60 余

种, 累积推广面积已达 2000 万 hm^2 (3 亿亩)^[4], 但由于不同类型的稳定性氮肥影响其养分释放因素不同, 目前在不同土壤、作物背景下, 肥料功效不一。张文学等^[15]研究表明, 肥料中脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用显著提高水稻孕穗期土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量、水稻产量及植株地上部氮素回收率, 生产实践上具有氮肥后移的重要效果。Li 等^[16-17]通过对华北和西北地区 3 个典型的小麦-玉米轮作模式田间试验研究发现, 稳定性氮肥较常规尿素施氮量减少 20%, 既可使玉米保持稳产或者小幅度增产, 又可显著降低 NH_3 挥发损失, 提高氮肥利用率。孙爱文等^[18]研究表明, 施用添加两种抑制剂的稳定性肥料较普通氮肥处理显著增加了玉米百粒重和产量。Qiao 等^[19]和 Yang 等^[20]对全球不同玉米区施用硝化抑制剂的试验进行了 Meta 分析, 发现肥料中添加硝化抑制剂可显著降低氧化亚氮的排放, 减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶损失, 同时显著增加产量和经济效益。张英鹏等^[21]在华北小麦-玉米轮作体系下的研究结果表明, 稳定性氮肥处理与普通尿素处理相比, 能保证作物产量及地上部吸氮量, 还能提高 0—40 cm 土层土壤无机氮含量以及降低 40—100 cm 土层土壤无机氮含量。大量研究表明稳定性氮肥减量施用在玉米上表现出良好的稳产、增产效果^[16-17], 但目前农业生产中缺乏针对不同土壤和气候条件下春玉米生产的稳定性氮肥推荐施用量。为此, 我们在辽中、辽南地区开展了稳定性氮肥不同减施比例一次性施用在春玉米上的应用效果研究。针对辽中、辽南春玉米产区的土壤和气候特征, 通过田间试验探究稳定性氮肥不同减施施用条件下, 春玉米的产量和效益特征、植株养分吸收特性与土壤无机氮含量动态的相互关系, 旨在明确肥料养分释放与植株养分吸收同步性更好的稳定性氮肥用量, 为当地春玉米生产中稳定性氮肥的施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

春玉米田间小区试验于 2017 年 5—9 月份在沈

阳农业大学北山科研基地 (沈阳, $40^\circ 48' \text{N}$ 、 $123^\circ 33' \text{E}$) 和沈阳农业大学海城教学实习基地 (海城, $40^\circ 85' \text{N}$ 、 $122^\circ 75' \text{E}$) 进行。沈阳农业大学北山科研基地处于松辽平原, 年平均降水量 574~684 mm, 年平均气温 7.0°C ~ 8.1°C , 无霜期为 148~180 天; 沈阳农业大学海城教学实习基地位于辽宁南部, 辽东半岛北端, 属暖温带大陆性季风气候区, 年平均气温 10°C 以上, 年积温在 3000°C ~ 3100°C , 无霜期 170 天左右, 年降水量在 600~800 mm。土壤类型均为棕壤, 属于淋溶土, 基本理化性质见表 1。供试肥料为普通尿素 (含 N 46%, 北方华锦化学工业股份有限公司生产)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 12%, 铜陵市铜官山化工有限公司生产)、硫酸钾 (含 K_2O 50%, 吉林金秋肥业科技有限公司生产)、稳定性氮肥 (同时添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂的一类肥料, 沈阳中科新型肥料有限公司生产)。根据辽宁省 21 个监测站 1957 至 2000 年共 44 年的月降水资料进行分析, 其特征为从 6 月份开始增加、7 月份陡升达到峰值、8 月份稍有回落、9 月份急剧减少^[4]。

1.2 试验设计

两个试验区均设置了不施氮处理 (CK)、普通尿素常规施氮量 (CK1) 和普通尿素减氮 10% (CK2) 对照处理; 稳定性氮肥处理 (S), 其中沈阳试验区稳定性氮肥减氮处理设置了 3 个减施比例 (S1、S2、S3), 海城试验区设置了两个减施比例 (S1、S2)。S1、S2、S3 处理较 (CK1) 处理减氮比例分别为 10%、15%、20%; 两个试验区常规施氮量 (CK1) 是根据辽宁省测土配方施肥项目推荐施肥量确定, 沈阳试验区常规氮肥用量为 $244 \text{ kg}/\text{hm}^2$, S1 氮肥用量为 $220 \text{ kg}/\text{hm}^2$, S2 氮肥用量为 $207 \text{ kg}/\text{hm}^2$, S3 氮肥用量为 $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 各处理磷、钾肥用量相同, 施磷量 (P_2O_5) $97.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、施钾量 (K_2O) $101.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 海城试验区常规氮肥用量为 $217 \text{ kg}/\text{hm}^2$, S1 氮肥用量为 $195 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、S2 氮肥用量为 $184 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 各处理磷、钾肥用量相同, 施磷量 (P_2O_5) $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、施钾量 (K_2O) $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。试验用氮肥包括普通尿素 (含 N 46%)、稳定性氮肥 (含 N 26%, 在常规肥料中添加脲

表 1 供试土壤基本理化性状 (0—20 cm)

Table 1 Basic soil properties of the experimental sites

试验地点 Experimental site	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	无机氮 (mg/kg) Inorganic N	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
沈阳 Shenyang	5.14	14.61	8.53	0.83	91.40	7.60	89.80
海城 Haicheng	5.14	22.30	18.25	0.86	129.60	27.42	122.76

酶/硝化抑制剂制成, 属缓释氮肥)。施用稳定性氮肥的各处理, 若稳定性氮肥中磷、钾数量不足, 用过磷酸钙和硫酸钾补足。沈阳试验区于 5 月 8 日播种, 9 月 26 日收获, 供试玉米品种为东单 6531; 海城试验区于 5 月 11 日播种, 9 月 24 日收获, 供试玉米品种为铁研 358。所有肥料均作基肥在播种当天一次性以垄施方式施到种子行侧下方 8—10 cm 土层。小区面积 30 m²。各处理均设 3 次重复, 随机区组排列, 田间管理方法同当地。

1.3 测定项目与方法

分别在播前、播种后 7 天、玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、乳熟期、成熟期, 采集 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土样, 测定土壤无机氮含量及含水量。

于各时期取 5 株长势均匀一致的植株, 按器官分离, 在 105℃ 杀青 30 min 后, 80℃ 烘至恒重, 测定玉米氮素吸收量。

土壤无机氮含量 (土壤鲜样) 用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提, 采用连续流动分析仪 (AA3, SEAL Analytical, 德国) 测定; 玉米植物样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 用凯氏定氮仪测定全氮含量。玉米成熟期每处理小区测产 15 m², 调查株数、双穗率和空秆率, 按籽粒含水率 14% 折算产量。

氮素相关参数计算:

植株氮素积累量 (kg/hm²) = 单株干重 × 植株含氮量 × 种植密度;

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮小区籽粒产量 - 不施氮小区籽粒产量) / 施氮量;

氮素表观利用率 (%) = (施氮区植株地上部吸氮量 - 不施氮区植株地上部吸氮量) / 施氮量 × 100;

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮肥区产量 / 施氮肥量;

植株氮素吸收强度 [kg/(hm²·d)]^[3-4, 22] = (某个生育时期的氮素含量 - 上个生育时期的氮素含量) / 天数;

肥料氮残留量 (kg/hm²)^[23] = 施氮处理当季无机氮残留量 (kg/hm²) - 不施氮处理当季无机氮残留量 (kg/hm²);

肥料氮残留率^[23] = 肥料氮残留量 (kg/hm²) / 施氮量 (kg/hm²) × 100%。

土壤无机氮残留量的计算^[24]为:

土壤无机氮残留量 = 土层厚度 × 土壤面积 × 土壤容重 × 土壤无机氮含量

此处无机氮指 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 之和。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理数据、作图和 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析; 两地间土壤无机氮和氮素利用试验数据趋势相近, 用沈阳试验区数据呈现; 采用 Duncan 法进行显著性检验, $P < 0.05$ 为显著。

2 结果与分析

2.1 施用稳定性氮肥对春玉米产量和经济效益的影响

由表 2 可知, 两地产量均表现为施氮肥处理显著高于不施氮肥处理, 表明施用氮肥对春玉米增产效果显著; 稳定性氮肥各处理与普通尿素常规用量处理 (CK1) 相比, 除沈阳区 S2 处理显著高于其 CK1, 两地处理间产量和净收入没有显著差异, 且在沈阳试验区表现出小幅度增产增效, 海城试验区产量和净收入基本持平; 与普通尿素减量施肥处理 (CK2) 相比, 稳定性氮肥各处理产量和经济效益均表现出 S2 > S1 > S3 > CK2, 且差异显著; 在肥料投入和净收入方面, 稳定性氮肥处理比普通尿素处理分别高 120~292 元/hm² (沈阳)、256~353 元/hm² (海城) 和 1842~2808 元/hm² (沈阳)、2389~2685 元/hm² (海城)。结果说明, 稳定性氮肥较 (CK1) 处理减氮 10%~20% 施用, 可达到玉米稳产和增产的作用; 施用稳定性氮肥虽然增加了肥料成本, 但由于同时也大幅提高了玉米产量, 因此净收入也显著提高; 在各稳定性氮肥减氮处理中, 以减氮 15% (S2) 处理增产增收作用最显著, 其中沈阳试验较 CK1 增产、增收幅度分别为 7.5%、1795 元/hm², 较 CK2 分别为 11.1%、2808 元/hm²; 而海城试验产量与 CK1 没有显著区别, 收入减少 184 元/hm², 与 CK2 相比, 增产 19.5%, 增收 2685 元/hm²。

2.2 不同施肥处理对玉米氮素积累和利用效率的影响

由图 1 可见, 稳定性氮肥各处理氮素总积累量均高于普通尿素处理, 表现为 S2 > S1 > S3 > CK1 > CK2; 由图 2 可知, 稳定性氮肥处理氮素表观利用率 (S2 处理)、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均显著高于普通尿素处理, 提高幅度依次为 10.4%~12.4%、3.4%~6.2% 和 6.5%~10.8% (较 CK1 处理); 10.2%~12.2%、3.3%~6.1% 和 3.3%~7.6% (较 CK2 处理), 各稳定性氮肥处理中以减氮 15% 的处理 (S2) 氮素利用效率最高。这是由于普通尿素和稳定

表 2 不同施肥处理对春玉米产量和经济效益的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on the yield and economic benefits of spring maize

试验地点 Experimental site	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	产值 Output value (yuan/hm ²)	肥料投入 Fertilizer input (yuan/hm ²)	人工投入 Manual input (yuan/hm ²)	总成本 Total cost (yuan/hm ²)	净收入 Net income (yuan/hm ²)
沈阳 Shenyang	CK	6855 d	10420	1371	2250	3621	6799 d
	CK1	10042 b	15264	2432	2250	4682	10582 b
	CK2	9307 c	14146	2327	2250	4577	9569 c
	S1	10887 ab	16549	2619	2250	4869	11680 ab
	S2	11289 a	17159	2532	2250	4782	12377 a
	S3	10598 ab	16108	2447	2250	4697	11411 ab
海城 Haicheng	CK	7300 c	11096	1031	2250	3281	7815 c
	CK1	11850 a	18012	1974	2250	4224	13788 a
	CK2	9900 b	15048	1879	2250	4129	10919 b
	S1	11716 a	17808	2250	2250	4500	13308 ab
	S2	11835 a	17989	2135	2250	4385	13604 a

注 (Note): 尿素 Urea 2.00 yuan/kg, 稳定性氮肥 Stabilized urea 3.00 yuan/kg, 磷肥 Phosphate fertilizer 1.0 yuan/kg, 钾肥 Potassium fertilizer 3.75 yuan/kg, 人工费 Manual input 100 yuan per person per day, 玉米 Maize 1.52 yuan/kg; 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达到 5% 的显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant difference at 5% level among treatments.

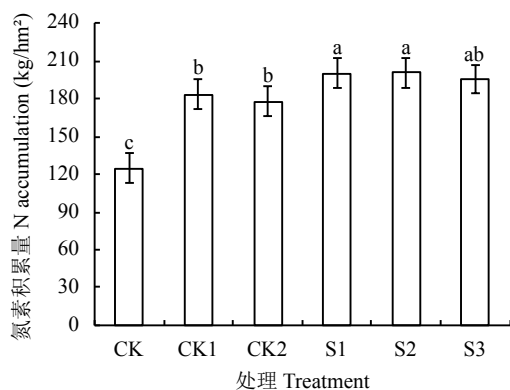


图 1 不同施肥处理对玉米氮素积累量的影响 (沈阳)

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on nitrogen accumulation of maize (Shenyang)

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

性氮肥在玉米生育期间的供氮规律不同, 普通尿素一般养分释放期为 15 天左右^[25], 稳定性氮肥可延长至 60 天左右^[26], 这对玉米生育中后期的氮素吸收影响尤为显著, 稳定性氮肥在玉米生殖生长阶段氮素有效期仍可继续满足玉米的氮素需求, 因而植株氮素积累总量显著增加, 氮肥利用效率显著提高; 而普通尿素此时养分已经释放殆尽, 无法满足玉米籽粒灌浆的氮素需求, 因而导致氮素积累总量显著减少, 氮肥利用效率显著降低。

2.3 不同施肥处理土壤氮素供应和植株氮素吸收特征

由图 3 可见, 不同处理玉米各生育期 0—20 cm 土层中铵态氮和硝态氮含量变化表现为先上升后下降的趋势。稳定性氮肥处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在玉米苗期达到高峰, 之后显著下降 ($P < 0.05$), 但与普通尿素处理相比, 仍然相对较高; 而普通尿素处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高峰出现在施肥后 7 天, 之后便迅速下降, 直至成熟期一直保持相对较低水平, 说明施用稳定性氮肥由于脲酶抑制剂的添加延缓了氮素的释放, 从而推迟了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量达到高峰的时间, 且由于硝化抑制剂的添加, 抑制了硝化作用速率, 使得土壤中保持相对较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。

由图 4 可见, 稳定性氮肥处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在苗期达到高峰, 但含量低于 CK1 处理; 在拔节期和大喇叭口期与 CK1 和 CK2 相比也较低, 但在抽雄至成熟期一直显著高于 CK1 和 CK2 ($P < 0.05$); 普通尿素处理在施肥后 7 天其土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量就显著高于稳定性氮肥处理 ($P < 0.05$), 且在大喇叭口期前基本维持在较高含量水平, 但在抽雄期至成熟期显著低于稳定性氮肥处理 ($P < 0.05$)。说明施用稳定性氮肥能够延长氮肥的肥效, 更有利于作物在生育中后期获得充足的氮素供应, 从而促进作物产量和肥料利用效率的提高。

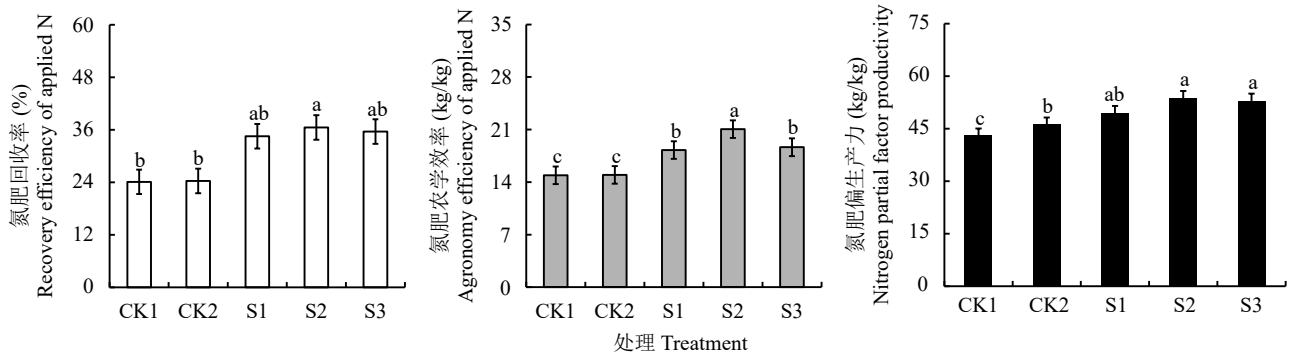


图 2 不同施肥处理对玉米氮素利用效率的影响 (沈阳)

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency of maize (Shenyang)

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same index ($P < 0.05$.)

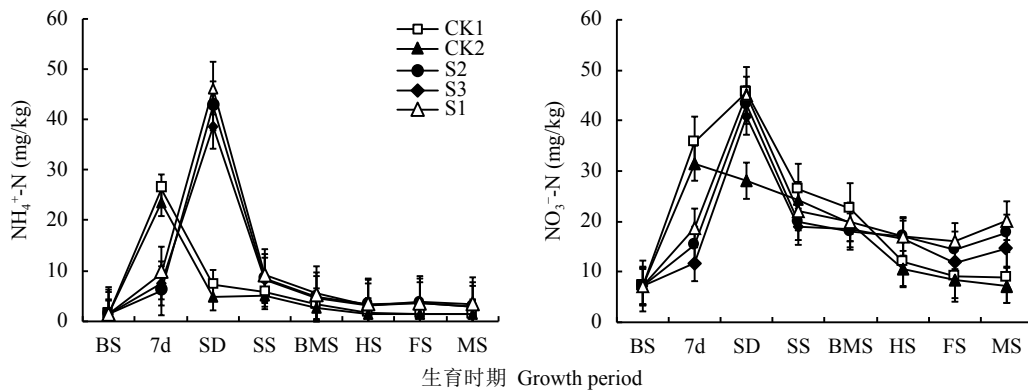


图 3 玉米各生育期 0—20 cm 土层土壤铵态氮和硝态氮的动态变化 (沈阳)

Fig. 3 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in 0-20 cm soil layer at different growth stages of maize (Shenyang)

[注 (Note): BS—播前 Before seeding; 7d—施肥后 7 天 7 days after fertilization; SD—苗期 Seedling stage; SS—拔节期 Shooting stage; BMS—大喇叭口期 Bell-mouthed stage; HS—抽雄期 Heading stage; FS—乳熟期 Filling stage; MS—成熟期 Maturity stage.]

由图 4 可见, 不同施氮处理土壤无机氮含量主要在 0—20、20—40 cm 土层表现出较大差异; 在 60—80 cm 土层, 普通尿素处理 CK1、CK2 无机氮含量与播前相比增加幅度比稳定性氮肥处理更高。各处理 0—40 cm 土层无机氮含量在苗期最高, 从苗期到抽雄期均呈显著下降趋势, 抽雄期降至整个生育期最低, 成熟期又有小幅提高, 但均显著大于播前 (BS) 0—40 cm 土层土壤无机氮含量 ($P < 0.05$), 即经过玉米整个生育期, 至收获时土壤中仍有一定量肥料氮素的残留。总体上稳定性氮肥处理 (S1、S2、S3) 耕层土壤无机氮含量在玉米生育前期 (苗期、拔节期) 低于普通尿素处理 (CK1、CK2), 在玉米生育中后期 (大喇叭口期至成熟期) 0—40 cm 土层无机氮含量显著高于普通尿素处理 ($P < 0.05$), 但总体上无机氮含量在 0—40 cm 土层中变化较普通尿素处理平缓; 且在 0—40 cm 土层内随氮肥用量增加, 无机氮含量增加, 施用普通尿素的两处理也表现出这一特征 (图 4)。成熟期肥料氮素残留量 (图 5) 显

示, 与普通尿素相比, 施用稳定性氮肥可使 0—40 cm 土层土壤中残留更多的氮素, 且随施氮量的增加而增加, 这说明施用稳定性氮肥更有利于氮素保留在土壤中, 从而减少了挥发和淋溶等损失, 更有利于环境质量的提升。

由图 6 可见, 施用氮肥显著提高了不同玉米生育期的植株氮素吸收强度 ($P < 0.05$); 各处理均在拔节期出现一个显著的氮素吸收高峰, 且在吸收高峰点各处理之间吸收强度数值接近。稳定性氮肥各处理在玉米生育前期如苗期、大喇叭口期氮素吸收强度均低于普通尿素处理, 但在抽雄期和成熟期显著高于普通尿素处理 ($P < 0.05$); 而普通尿素处理在拔节期氮素吸收高峰之后, 其吸收强度便呈快速下降趋势, 至成熟期降至与不施氮肥处理相近。

3 讨论

作物产量、经济效益及肥料利用效率是施肥合

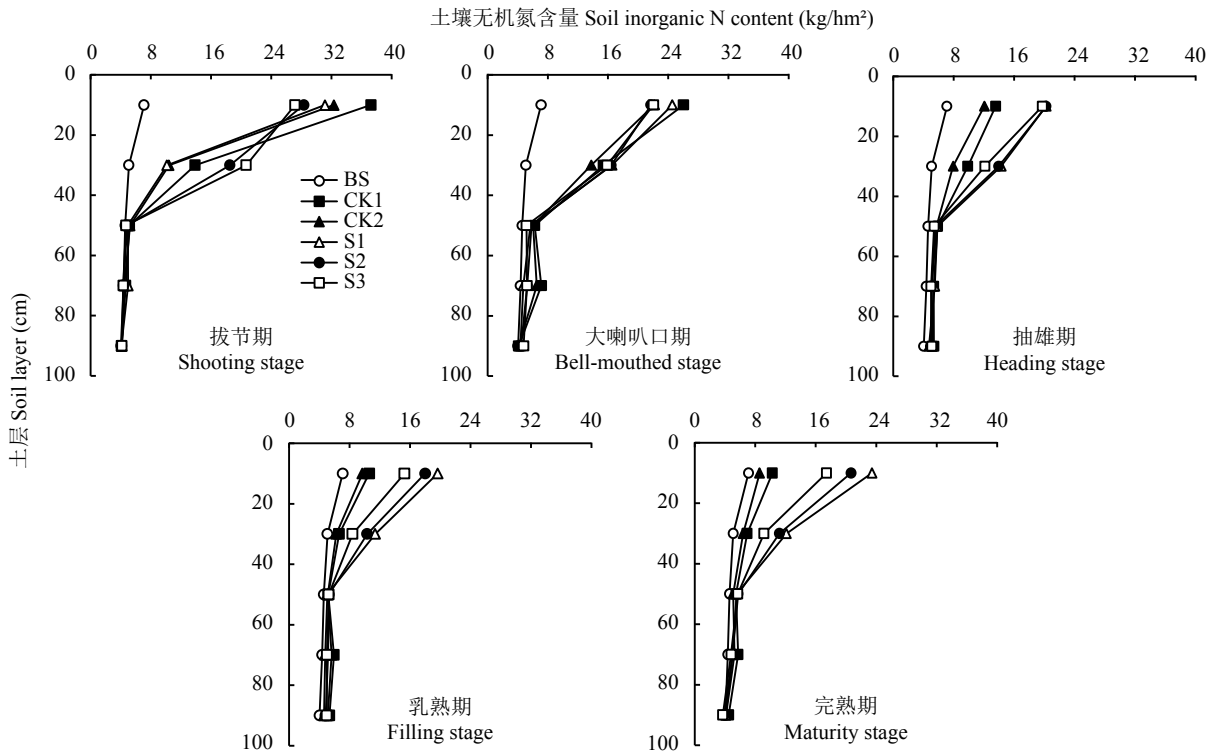


图 4 不同施肥处理对土壤无机氮含量的影响 (沈阳)

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on soil inorganic nitrogen content (Shenyang)

[注 (Note) : BS—播前 Before seeding.]

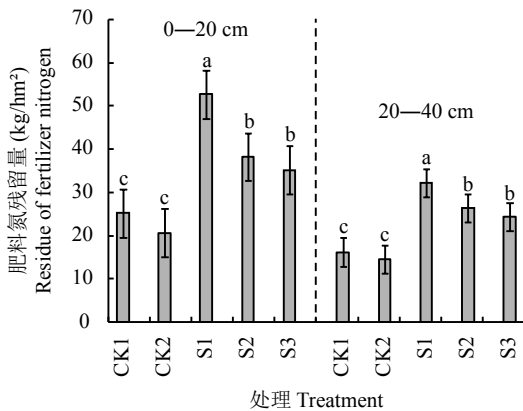


图 5 不同施肥处理对收获期肥料氮残留量的影响 (沈阳)

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on nitrogen residues of fertilizers in harvest period (Shenyang)

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same soil layer ($P < 0.05$).]

理与否的重要评价指标^[27-29]。已有研究表明, 稳定性氮肥一次性施用较当地常规尿素用量减少 20% 基施, 不但可保证作物不减产, 而且还有小幅增产^[16-17], 并减少氮素损失, 提高氮肥利用率^[15, 30]。稳定性氮肥与等氮磷钾养分含量的普通速效单质肥料相比价格

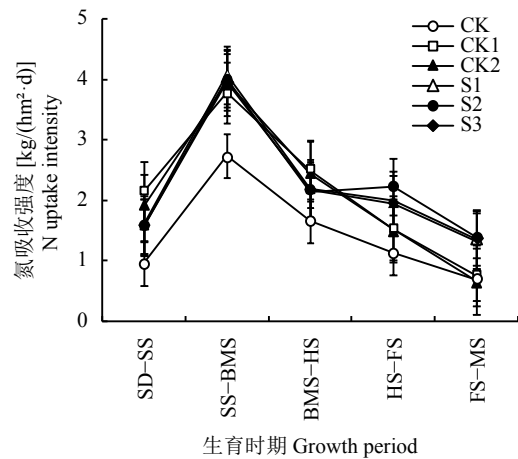


图 6 不同施肥处理对玉米氮素吸收强度的影响 (沈阳)

Fig. 6 Effects of different fertilization treatments on nitrogen absorption intensity of maize (Shenyang)

[注 (Note) : SD—苗期 Seedling stage; SS—拔节期 Shooting stage; BMS—大喇叭口期 Bell-mouthed stage; HS—抽雄期 Heading stage; FS—乳熟期 Filling stage; MS—成熟期 Maturity stage.]

偏高, 即使在减氮 20% 情况下肥料成本也相对较高, 但由于稳定性氮肥在增产和提高肥效方面的突出作用, 仍然可以保证作物的经济效益不降低^[19], 或

者使其显著提高^[20,31]。本研究结果表明, 稳定性氮肥减氮 10%~20% 施用均能维持和增加玉米产量, 显著提高氮肥利用效率, 其中以减氮 15% 的 S2 处理对产量和氮肥利用效率提升作用最显著。在减氮 15% 条件下, 沈阳试验区的净收入较普通尿素增加 17.0%, 海城试验区基本持平。

肥料养分供应与作物养分需求在数量上匹配、时间上同步、空间上一致是获得作物高产、肥料高效利用^[32-35]、较高经济效益的关键。在本研究中, 根据辽中和辽南地区土壤和气候条件, 其中, 土壤类型为棕壤, 属于淋溶土, 下层的持水能力强于上层, 但其空间变异性弱于上层^[36]; 对试验年份中降水的周期特征进行分析, 发现 2017 年 6—8 月份的月总降雨量变化趋势, 基本与辽宁省 21 个监测站 1957—2000 年共 44 年的月降水资料的变化曲线相吻合, 其表现出从 6 月份逐渐增加、7 月份陡升达到峰值、8 月稍有回落、9 月急剧减少的趋势^[4]; 施用稳定性氮肥条件下, 在玉米整个生育期内无机氮主要分布在 0—40 cm 土层, 在 60—100 cm 土层无机氮含量与播种前该土层无机氮含量无明显差异; 这是因为稳定性氮肥中添加的硝化抑制剂降低了硝化作用速率, 减少了硝态氮的生成, 从而减少了硝态氮向深层土壤的淋溶^[37], 使氮素主要保存在 0—40 cm 土层。相关研究表明, 在常年旋耕条件下玉米根系主要分布在上层土壤中, 其中 0—30 cm 土层根量最大^[38], 这说明稳定性氮肥的养分供应与玉米养分吸收在空间上更加一致。稳定性氮肥各处理土壤铵态氮含量高高峰期较普通尿素处理延迟了 2 周, 铵态氮和硝态氮含量均在苗期达到峰值, 且铵态氮含量峰值显著高于普通尿素处理 ($P < 0.05$), 硝态氮含量在达到峰值前一直处于较低水平, 说明在辽中、南地区土壤和气候特定条件下, 稳定性氮肥中的脲酶抑制剂和硝化抑制剂有效延缓了玉米生育前期肥料氮素释放和硝化作用的速率, 从而减少了氨挥发和硝态氮淋溶损失风险^[20,39]。这与已有的研究^[21,37]结果相似; 在玉米整个生育期内, 0—40 cm 土层无机氮含量的变化较普通尿素处理更加平缓, 特别是在玉米生育后期(抽雄期至成熟期)土壤中继续保持较高的无机氮含量水平, 这是因为添加脲酶抑制剂延缓了氮素养分的释放速率, 肥效期延长^[4]。拔节期—大喇叭口期是玉米整个生育期内氮素吸收强度最大的时期(图 6), 抽雄-成熟期是籽粒建成关键时期^[40], 稳定性氮肥既满足了氮素吸收高峰期对氮素养分的需求, 又延长了肥效, 保证了在籽粒建成期充足的氮素供应, 使得肥料养分释放与作物氮素吸收强度更加匹配, 因

此获得了更高的产量; 相关研究表明, 花后养分供应和作物养分吸收状况对产量的影响显著, 超高产夏玉米整个生育期能持续吸收养分, 吐丝后适当追肥保证灌浆期养分充足供应对夏玉米超高产至关重要^[41-42]。与施用普通尿素相比, 稳定性氮肥在玉米生育后期维持较高的氮素供应水平, 从而促进了氮肥利用效率和玉米产量的提高, 在各稳定性氮肥处理中, 以减氮 15% 处理(S2)表现最佳。这说明结合辽中南地区土壤和气候特定条件施用稳定性肥料, 特别是在 S2 处理施肥量条件下, 肥料养分供应与玉米养分吸收在时间上更同步, 在肥量上更匹配。

施用普通尿素处理(CK1、CK2)其土壤铵态氮含量在施肥后 7 天就已达到峰值, 硝态氮含量在玉米苗期达到峰值, 但在此前已持续处于较高含量状态, 相关研究也表明, 普通尿素一般养分释放期为 15 天左右^[26]; 说明在施用普通尿素情况下, 肥料氮素的释放和硝化作用都非常迅速。在玉米植株尚未进入营养生长期, 此阶段植株的氮素吸收能力还非常弱, 在短时间内氮素大量释放和转化极易引起作物生育前期的大量氨挥发、硝态氮淋溶损失^[21]及后期的氮素供应不足^[2-3], 另外施用普通尿素条件下在 60—100 cm 土层无机氮含量相对较高, 因此肥料养分供应与植株养分吸收之间在时间上的不同步、肥量上的不匹配、空间上的不一致, 是导致玉米产量、效益和肥料利用效率显著下降的主要原因^[4]。

4 结论

与常规施氮处理相比, 结合辽中、辽南春玉米产区特定土壤和气候条件下, 施用稳定性氮肥在土壤无机氮供应与植株吸收氮素匹配性上更强, 特别是在中后期土壤无机氮含量维持较高水平, 减小了玉米籽粒建成期氮素供需之间的差距。与常规施尿素相比, 在沈阳试验点稳定性尿素氮用量减少 15% 时, 玉米的产量和经济效益、氮素累积总量和氮素表观利用率, 氮肥农学利用率和氮肥偏生产力等都最高; 而在海城试验点, 由于普通尿素投入量相对较低, 最佳稳定性尿素推荐量为减氮 10%。

参考文献:

- [1] 韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学博士学位论文, 2015.
Han W J. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil[D]. Changchun: PhD Dissertation of Jilin Agricultural University, 2015.
- [2] 孙许, 张吉旺, 靳立斌. 玉米高产与氮肥高效协同实现存在的问题及其途径[J]. 玉米科学, 2014, (1): 143-148.

- Sun X, Zhang J W, Jin L B. Problems and approaches of achieving high yield and high nitrogen use efficiency in maize production[J]. *Journal of Maize Science*, 2014, (1): 143–148.
- [3] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3951–3960.
- Wang Q, Qiang L N, Pan J Q, *et al.* Yield and nitrogen adsorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3951–3960.
- [4] 冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 等. 包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(10): 1733–1745.
- Feng X J, Zhan X M, Wang X X, *et al.* Effects of soil inorganic nitrogen and nitrogen absorbing by maize under the reduced application of coated urea at different proportions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(10): 1733–1745.
- [5] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al.* Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117–125.
- [6] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Ecology controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014–1015.
- [7] Oita A, Malik A, Kanemoto K, *et al.* Substantial nitrogen pollution embedded in international trade[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3): 111–115.
- [8] Zhang W, Dou Z, He P. Improvements in manufacture and agricultural use of nitrogen fertilizer in China offer scope for significant reductions in green[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110: 8375–8380.
- [9] 陈坤, 徐晓楠, 彭靖, 等. 生物炭及炭基肥对土壤微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(10): 1920–1930.
- Chen K, Xu X N, Peng J, *et al.* Effects of biochar and biochar-based fertilizer on soil microbial community structure[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10): 1920–1930.
- [10] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1094–1102.
- Tong Y X, Li Y Y, Liu S Q, *et al.* Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1094–1102.
- [11] 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.
- Hou Y P, Li Q, Kong L L, *et al.* Effects of different slow/controlled release nitrogen fertilizers on spring maize nitrogen uptake and utilization, soil inorganic nitrogen and nitrogen balance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3928–3940.
- [12] 杨俊刚, 高强, 曹兵, 等. 一次性施肥对春玉米产量和环境效应的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 123–128.
- Yang J G, Gao Q, Cao B, *et al.* Effect of single fertilization on spring maize yield and environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(6): 123–128.
- [13] Li P, Lu J, Yang W, *et al.* Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [14] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- Wu Z J, Shi Y L, Li D P, *et al.* The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1614–1621.
- [15] 张文学, 杨成春, 王少先, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(4): 417–424.
- Zhang W X, Yang C C, Wang S X, *et al.* Effects of urease inhibitor and nitrification inhibitor on nitrogen transformation in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(4): 417–424.
- [16] Li Q, Yang A, Wang Z, *et al.* Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 96–105.
- [17] Li Q, Cui X, Liu X, *et al.* A new urease-inhibiting formulation decreases ammonia volatilization and improves maize nitrogen utilization in North China Plain[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43853.
- [18] 孙爱文, 石元亮, 尹宏斌, 等. 硫脲对脲酶活性和尿素氮转化的试验初报[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 554–557.
- Sun A W, Shi Y L, Yin H B, *et al.* Effect of thiourea on urease activities and transformation of urea–N[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 554–557.
- [19] Qiao C L, Liu L L, Hu S J, *et al.* How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1249–1257.
- [20] Yang M, Fang Y, Sun D, *et al.* Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22075.
- [21] 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): 1–11.
- Zhang Y P, Li H J, Liu Z H, *et al.* Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss of wheat–maize rotation system of farmland in chao soil region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1–11.
- [22] 徐晓楠, 陈坤, 冯小杰, 等. 生物炭提高花生干物质与养分利用的优势研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 444–453.
- Xu X N, Chen K, Feng X J, *et al.* Preponderant effect of biochar application in peanut dry matter accumulation and fertilizer nutrient use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 444–453.
- [23] 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.
- Wang X M, Xie Y X, Zhang Y N, *et al.* Effect of new type fertilizers application on accumulation of soil nitrate nitrogen in the maize season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 232–236.
- [24] 李强, 王朝辉, 戴健, 等. 氮肥调控与地表覆盖对旱地冬小麦氮素吸收及残留淋失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(7): 1380–1389.
- Li Q, Wang Z H, Dai J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer regulation and soil surface mulching on nitrogen use by winter wheat and its residue and leaching in dry land soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1380–1389.
- [25] 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.
- Shi G F, Dong H, Yi W P, *et al.* Effects of different application rates of long-term controlled-release fertilizer on growth, development and yield of summer maize[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(7): 95–98.
- [26] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, (1): 94–99.
- Hua J F, Jiang Q, Shi C J, *et al.* Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, (1): 94–99.
- [27] 方玉凤. 硝化抑制剂对尿素氮转化及玉米氮素利用和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学博士学位论文, 2016.
- Fang Y F. Effects of nitrification inhibitor on nitrogen transformation of urea and nitrogen utilization and yield of maize [D]. Haerbin: PhD Dissertation of Northeast Agricultural University, 2016.
- [28] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 116–120.
- Hu J, Wu J G, Sun J M, *et al.* Effects of reduced nitrogen fertilization and its combined application with slow and controlled release fertilizers on soil nitrogen characteristics and yield of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 116–120.
- [29] 米国华, 伍大利, 陈延玲, 等. 东北玉米化肥减施增效技术途径探讨[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2758–2770.
- Mi G H, Wu D L, Chen Y L, *et al.* The ways to reduce chemical fertilizer input and increase fertilizer use efficiency in maize in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2758–2770.
- [30] Zheng W, Zhang M, Liu Z, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52–62.
- [31] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, (2): 155–161.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, *et al.* Effects of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, (2): 155–161.
- [32] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–677.
- [33] Zhang F S, Shen J B, Zhang J L, *et al.* Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 107: 1–32.
- [34] Geng J B, Ma Q, Zhang M, *et al.* Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 9–16.
- [35] 邵蕾, 张民, 王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, (6): 115–119.
- Shao L, Zhang M, Wang L X. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, (6): 115–119.
- [36] 王展. 辽南地区棕壤持水特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2005.
- Wang Z. Study on water holding characteristics of brown soil in southern Liaoning Province[D]. Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2005.
- [37] 谷佳林, 边秀举, 刘梦星, 等. 不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及硝态氮土壤残留与淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, (5): 173–177.
- Gu J L, Bian X J, Liu M X, *et al.* Effects of different slow-controlled release nitrogen fertilizer on *Festuca arundinacea* growth, nitrate nitrogen residual and leaching loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, (5): 173–177.
- [38] 战秀梅, 李秀龙, 韩晓日, 等. 新型缓释尿素对玉米和水稻产量、氮肥利用率及无机氮残留的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(2): 184–188.
- Zhan X M, Li X L, Han X R, *et al.* Effects of slow release nitrogen fertilizers on yield of maize and rice, nitrogen use efficiency and inorganic N residue[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(2): 184–188.
- [39] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混(合)肥氮挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 615–623.
- Li Y F, Jia K, Wang J Y, *et al.* Ammonia volatilization characteristics of different kinds of high-nitrogen compound fertilizers and their effects on nitrogen balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 615–623.
- [40] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151–3158.
- Wang Y L, Li C H, Tan J F, *et al.* Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3151–3158.
- [41] 王坤. 控释肥对小麦—玉米产量及养分吸收的影响[D]. 南京: 南京林业大学博士学位论文, 2010.
- Wang K. Effect of controlled release fertilizer on the yield and nutrient accumulation in the wheat-maize rotation system[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Forestry University, 2010.
- [42] 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.
- Wang Y L, Li C H, He P, *et al.* Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3): 559–566.