

掺混氮肥配施抑制剂对土壤氮库的调控作用

白杨 杨明 陈松岭 朱晓晴 蒋一飞 邹洪涛* 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业部东北耕地保育重点实验室/土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要 采用冬小麦盆栽试验,探讨掺混氮肥(缓释肥 N:普通尿素 N=1:1)配施氮肥抑制剂 NAM 对冬小麦土壤铵态氮、硝态氮、微生物生物量氮和固定态铵含量及小麦产量、氮肥利用率的影响,分析不同处理土壤矿质氮库、微生物生物量氮库和固定态铵库的动态变化特征.试验共设 6 个处理,不施氮肥(CK)、普通尿素(U)、掺混氮肥(MU)、MU+2.5‰NAM(MUN₁)、MU+5‰NAM(MUN₂)和 MU+7.5‰NAM(MUN₃).结果表明:与 MU 处理相比,MUN₂和 MUN₃处理推迟了 NH₄⁺-N 峰值出现的时间;小麦整个生长季,添加 NAM 处理的土壤矿质氮平均含量比 MU 处理下降了 5.3%~11.7%;分蘖期至抽穗期,MU 处理的微生物生物量氮矿化量和矿化率分别为 38.96 mg·kg⁻¹和 91.5%,均高于 U 处理,而 MUN₁、MUN₂和 MUN₃处理分别为 58.73 mg·kg⁻¹和 83.3%、94.20 mg·kg⁻¹和 94.6%、104.46 mg·kg⁻¹和 96.3%,添加 NAM 处理固定态铵的释放量比 MU 处理提高了 2.83~9.19 mg·kg⁻¹.通径分析结果显示,与 MU 处理相比,添加 NAM 减弱了土壤 NH₄⁺-N 库对 NO₃⁻-N 库的直接影响,增强了固定态铵库通过影响 NH₄⁺-N 库对 NO₃⁻-N 库的间接作用.同时,MUN₁、MUN₂和 MUN₃处理的小麦籽粒产量较 MU 处理分别提高了 31.6%、21.5%和 22.9%,氮肥利用率分别提高了 8.1%、13.5%和 3.1%.综上,配施 NAM 通过对氮素释放及在土壤中转化的双重调控,延迟土壤 NH₄⁺-N 峰值出现的时间及后续向 NO₃⁻-N 的转化,提高微生物生物量氮和固定态铵的供氮作用,从而提高了作物产量和氮肥利用率.

关键词 掺混肥;硝化抑制剂;脲酶抑制剂;土壤氮库;调控作用

Effects of the blended nitrogen fertilizers combined with inhibitors on soil nitrogen pools. BAI Yang, YANG Ming, CHEN Song-ling, ZHU Xiao-qing, JIANG Yi-fei, ZOU Hong-tao*, ZHANG Yu-long (College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China).

Abstract: Pot experiment with winter wheat was conducted to investigate the effects of blended nitrogen (N) fertilizer (slow-release fertilizer-N:urea-N=1:1) combined with N fertilizer inhibitor NAM on soil ammonium (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N), microbial biomass nitrogen (MBN) and fixed-ammonium (FN) contents. We analyzed dynamic characteristics of soil mineral N, MBN, FN pools under different treatments. There were six treatments, including no N fertilizer (CK), conventional urea (U), blended N fertilizer (MU), MU plus 2.5‰ NAM (MUN₁), MU plus 5‰ NAM (MUN₂), and MU plus 7.5‰ NAM (MUN₃). Our results showed that, compared to that of MU treatment, MUN₂ and MUN₃ delayed the appearance time of NH₄⁺-N peak. Averaged across the whole wheat growing period, soil mineral N content for NAM treatments decreased by 5.3%~11.7%. From tillering to maturity stage, MBN mineralization and mineralization rates were 38.96 mg·kg⁻¹ and 91.5%, which was higher than that of U treatment; MBN mineralization and mineralization rates for MUN₁, MUN₂ and MUN₃ treatments were 58.73 mg·kg⁻¹, 83.3%, 94.20 mg·kg⁻¹,

本文由国家自然科学基金项目(31572206)、国家科技支撑计划项目(2015BAD23B0203)、辽宁省“百千万人才工程”(2016921066)和辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(RC1705580)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31572206), National Key Technology Research and Development Program of China (2015BAD23B0203), Liaoning BaiQianWan Talents Program (2016921066) and Foundation for High-level Talents in Higher Education of Liaoning Province (RC1705580).

2018-11-02 Received, 2019-09-29 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: zouhongtao2001@163.com

94.6%, 104.46 mg · kg⁻¹ and 96.3%, respectively. The FA mineralization release for NAM treatments were higher by 2.83–9.19 mg · kg⁻¹ than that of MU treatment. The results of path analysis showed that NAM addition weakened the direct effect of soil NH₄⁺-N pool on NO₃⁻-N pool but enhanced the indirect effects of FN pool on NO₃⁻-N pool through affecting NH₄⁺-N pool. The wheat grain yields of the MUN₁, MUN₂ and MUN₃ treatments were significantly higher by 31.6%, 21.5% and 22.9% than that of MU treatment. Nitrogen use efficiencies were increased by 8.1%, 13.5% and 3.1%, respectively. In summary, through double regulation for N release and transformation in soil, NAM delayed the appearance time of soil NH₄⁺-N peak and retarded its transformation into NO₃⁻-N, and increased the roles of MBN and FN in supplying N, thereby increased crop yield and N-fertilizer use efficiency.

Key words: blended fertilizer; nitrification inhibitor; urease inhibitor; soil nitrogen pool; regulation.

农业上化学氮肥的过量或者不当施用造成肥料浪费的同时,引发了土壤、水体、空气污染等严重环境问题^[1-2].缓/控释肥料可延缓养分在土壤中的释放和转化,有助于肥料氮在土壤中的留存,留存的氮后续逐渐释放供作物吸收利用,从而提高氮肥利用率,减轻因肥料损失造成的环境污染问题^[3-5].

土壤保存氮素的主要形式为生物固定(土壤微生物生物量氮)和晶格固定(固定态铵).土壤微生物在氮循环过程中发挥着不可替代的作用^[6-8],每年经由微生物生物量周转的氮素达 73 ~ 323 kg · hm⁻²^[9].黏土矿物可将土壤中过多的铵暂时固定,进而减少氨挥发、淋洗及硝化-反硝化损失^[10-11],是土壤保氮过程中重要的参与者,其固定态铵库的供氮作用甚至超过无机氮库^[12].一些土壤可以固定超过 70%的肥料氮^[13],并且这些新固定的氮素中超过 80%将在随后的几周或生长季节释放^[14].董燕等^[15]试验结果显示,土壤微生物生物量氮和固定态铵较铵态氮和硝态氮更能反映土壤持续供氮的能力.施用缓释复合肥料处理的土壤微生物生物量氮、固定态铵和“铵离子周转库”的动态变化与小麦吸氮量之间呈显著负相关关系,可较好地协调作物吸收养分的速率,提高氮肥利用率.马强^[12]研究得出,抑制剂的添加有助于提高土壤微生物生物量氮和固定态铵在土壤保氮和供氮中的作用,协调土壤供氮与作物需氮的同步性,从而提高氮素供给的时效性.然而有关掺混氮肥配施抑制剂对土壤氮素固持和矿化的影响尚不清楚,本试验在施用掺混氮肥的基础上,配施不同用量的脲酶-硝化复合抑制剂 NAM[由脲酶抑制剂和硝化抑制剂等有机成分组合而成,主要包括双氰胺(DCD)和正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)],研究其对土壤氮素的调控作用,以期氮素高效利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年在沈阳农业大学科学试验基地进行,所用土壤类型为棕壤.试验开始前,采集 0 ~ 20 cm 土壤,自然风干后过 10 mm 筛备用.土壤基本理化性质为:有机质 19.9 g · kg⁻¹,全氮 2.1 g · kg⁻¹,碱解氮 103.1 mg · kg⁻¹,速效磷 54.8 mg · kg⁻¹,速效钾 92.6 mg · kg⁻¹,pH 6.88.供试作物为冬小麦,品种为‘矮抗 58’.盆栽用盆为直径 0.27 m、高 0.35 m 的瓦式盆.

试验所用缓释肥料由河南心连心化肥有限公司生产(含 N 43.2%);尿素为普通尿素(含 N 46.0%);供试抑制剂为 NAM 复合抑制剂,主要由脲酶抑制剂(DCD)和硝化抑制剂(NBPT)等有机成分组成^[16-17],由中国科学院沈阳应用生态研究所提供.

1.2 试验设计

准确称取试验设计用量的肥料和抑制剂,与 15 kg 土混匀后装于瓦式盆内.每盆播种 20 粒小麦种子,覆土 3 cm,出苗后(三叶期)定植至每盆 10 株.利用重量差减法每周补水 1 ~ 2 次,使土壤水分控制在田间持水量的 70%,其他管理措施与当地大田普通管理方式一致.试验共设 6 个处理:1) CK:不施氮肥;2) U:施用普通尿素;3) MU:施用掺混氮肥(缓释肥 N:普通尿素 N = 1:1);4) MUN₁:MU + 2.5‰ NAM(抑制剂用量为占施氮量的千分比,下同);5) MUN₂:MU + 5‰ NAM;6) MUN₃:MU + 7.5‰ NAM.各处理的氮磷钾养分施用量一致,其中,氮肥用量为 240 kg · hm⁻²;磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),用量为 180 kg · hm⁻²;钾肥为氯化钾(K₂O 60%),用量为 90 kg · hm⁻².掺混氮肥和磷钾肥于播种前一天全量基施,普通尿素分 2 次施入,50%基施,50%拔节期追

施,每个处理设置3个重复(3盆)。

1.3 采样方法

分别于冬小麦苗期、分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期收集土壤样品,具体做法:利用土钻采集每盆0~20 cm处的3个土样,采样点分别位于中心位置和距离中心位置5 cm,剔除植物残体,冷冻保存于-12℃冰柜待分析,采集土样后将盆内的原土覆平。

1.4 测定项目与方法

土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 测定:新鲜土样用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提,滤液用 Bran+Luebbe AA3 流动分析仪测定;土壤微生物生物量氮采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定^[18];固定态铵采用 Sliva-Bremner 法测定^[19];土壤和植株全氮采用浓硫酸+双氧水消煮,半微量凯氏定氮法测定^[20];土壤基本理化性质采用实验室常规方法测定^[21]。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理;运用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,并使用单因素方差分析法(one way-ANOVA)和 LSD 法进行多重比较($\alpha=0.05$);采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 掺混氮肥配施抑制剂对土壤中矿质氮含量变化的影响

2.1.1 铵态氮 由图1可知,各处理土壤的 NH_4^+ -N 含量均呈先上升后下降的变化趋势。苗期尿素处理(U)的 NH_4^+ -N 含量最高,为 $51.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,掺混氮肥(MU)比U处理降低了 $3.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。分蘖期以前,添加NAM处理的 NH_4^+ -N 含量均低于MU处理,并且随抑制剂添加量的增加而降低。CK、U和MU处理的 NH_4^+ -N 含量峰值在分蘖期出现,分别为 40.89 、 58.53 和 $61.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, MUN_2 和 MUN_3 处理的峰值延后,在拔节期出现,分别为 65.99 和 $58.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比同时期MU处理增加了 44.8% 和 27.6% 。成熟期 MUN_1 处理的 NH_4^+ -N 含量最高,为 $28.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.1.2 硝态氮 CK处理的 NO_3^- -N 含量一直处于较低水平。U处理 NO_3^- -N 含量在分蘖期达到峰值,为 $105.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比同时期其他处理高 $6.54 \sim 49.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。拔节期, MU 和添加NAM的处理出现峰值,且均高于U处理,其中MU处理最高,为 $93.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比U处理增加了 20.5% ,其次是 MUN_3 和 MUN_2 处理, MUN_1 处理最低。小麦整个生长季, MU 处

理的 NO_3^- -N 平均含量最高,为 $54.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,添加NAM处理的 NO_3^- -N 平均含量降低了 $5.14 \sim 8.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。抽穗期后各处理间的 NO_3^- -N 含量差异变小(图1)。

2.1.3 矿质氮 从拔节期到抽穗期,各施肥处理土壤矿质氮含量均有不同程度降低,其中, MUN_2 处理土壤矿质氮下降最多,为 $112.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。分蘖期, U 和 MU 处理的矿质氮达到峰值,其中U处理最高,为 $164.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 MUN_2 和 MUN_3 处理土壤矿质氮含量峰值延后,于拔节期出现,分别为 149.16 和 $145.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整个生长季, CK 处理土壤矿质氮平均含量为 $56.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施肥显著提高了土壤矿质氮平均含量。其中, U 处理矿质氮平均含量为 $93.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, MU 处理为 $93.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; MUN_1 、

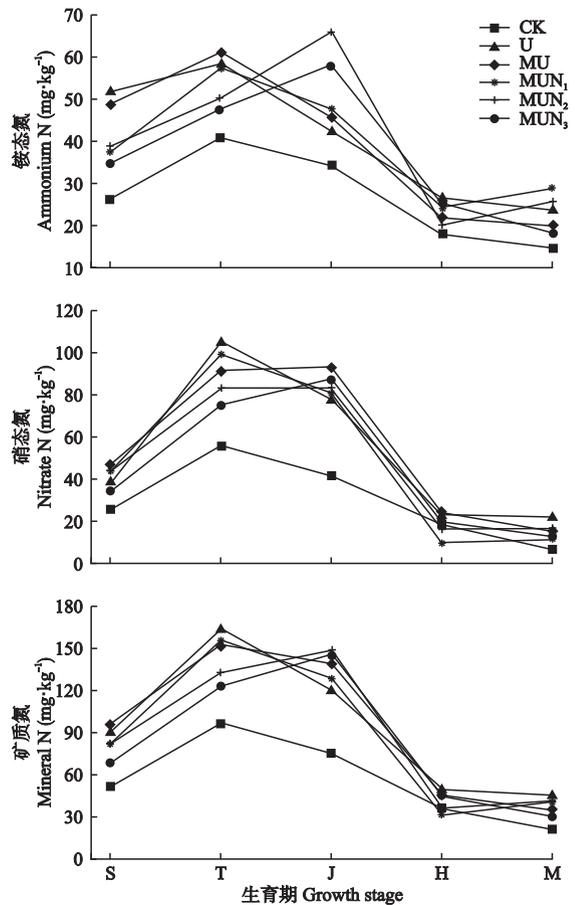


图1 不同生育期小麦土壤铵态氮、硝态氮和矿质氮含量的变化

Fig.1 Changes of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and mineral nitrogen contents in wheat soils in different growth stages.

CK: 对照 Control; U: 尿素 Urea; MU: 缓释肥 N: 普通尿素 N=1:1 Slow-release fertilizer-N; urea-N=1:1; MUN_1 : MU + 2.5% NAM; MUN_2 : MU + 5% NAM; MUN_3 : MU + 7.5% NAM. S: 苗期 Seedling stage; T: 分蘖期 Tillering stage; J: 拔节期 Jointing stage; H: 抽穗期 Heading stage; M: 成熟期 Maturity stage. 下同 The same below.

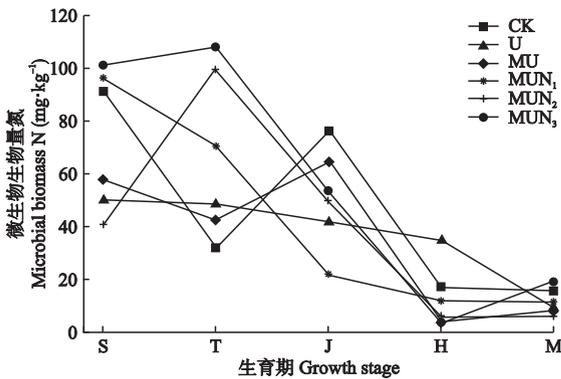


图2 不同生育期小麦土壤微生物生物量氮的变化

Fig.2 Changes of soil microbial biomass nitrogen in wheat soil in different growth stages.

MUN₂和 MUN₃处理土壤矿质氮平均含量分别为 87.93、88.43 和 82.49 mg · kg⁻¹,比 MU 处理分别减少了 5.9%、5.3%和 11.7%(图 1)。

2.2 掺混氮肥配施抑制剂对土壤微生物生物量氮变化的影响

如图 2 所示,U 处理的微生物生物量氮呈下降趋势;MU 和 MUN₁处理的微生物生物量氮于拔节期出现峰值,而后逐渐降低,MUN₂和 MUN₃处理的峰值比 MU 处理提前,在分蘖期出现,分别为 99.62 和 108.43 mg · kg⁻¹.分蘖期到抽穗期,MU 处理的微生物生物量氮矿化量和释放率为 38.96 mg · kg⁻¹和 91.5%,均高于 U 处理.添加 NAM 处理的微生物生物量氮矿化量和释放率比 MU 处理均有增加,并随 NAM 添加量的增加而增大,分别为 58.73 mg · kg⁻¹和 83.3%、94.20 mg · kg⁻¹和 94.6%、104.46 mg · kg⁻¹和 96.3%。

2.3 掺混氮肥配施抑制剂对土壤固定态铵含量变化的影响

不同施肥处理的土壤固定态铵含量均呈现先增加后降低的变化趋势,成熟期恢复至起始水平(图

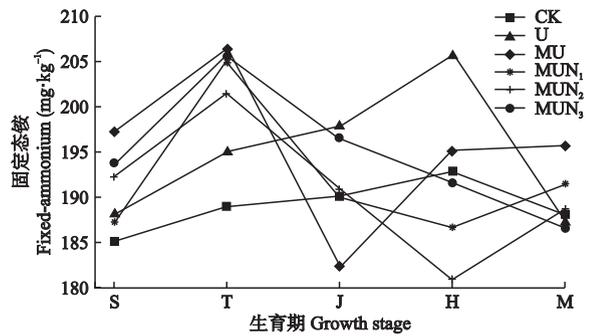


图3 不同生育期小麦土壤固定态铵含量的变化

Fig.3 Changes of fixed-ammonium contents in wheat soil in different growth stages.

3).CK 和 U 处理的固定态铵在抽穗期出现峰值,分别为 193.01 和 205.74 mg · kg⁻¹,MU 和添加 NAM 处理的固定态铵峰值在分蘖期出现,为 200.79 ~ 206.44 mg · kg⁻¹.分蘖期至抽穗期,添加 NAM 处理的固定态铵释放量为 14.14~20.50 mg · kg⁻¹,比 MU 处理多释放了 2.83~9.19 mg · kg⁻¹,其中,MUN₂处理固定态铵的释放量最大。

2.4 掺混氮肥配施抑制剂对各氮库分配的影响

由表 1 可知,分蘖期,U 处理已有 50.57 mg · kg⁻¹氮被微生物固持,195.13 mg · kg⁻¹氮被黏土矿物固定,MU 比 U 处理分别高 7.44 和 11.31 mg · kg⁻¹,配施 NAM 处理微生物固持氮量为 96.24~108.43 mg · kg⁻¹,显著高于 MU 处理,而黏土矿物固定氮为 201.05~205.03 mg · kg⁻¹,比 MU 处理略有下降.分蘖期至成熟期,MU 处理微生物生物量氮矿化释放量和固定态铵释放量分别为 34.23 和 10.61 mg · kg⁻¹,添加 NAM 增强了两种氮库氮素的释放,比 MU 处理分别多释放了 24.86~59.09 和 2.12~8.48 mg · kg⁻¹.其中 MUN₂处理微生物生物量氮矿化释放量最多,为 93.32 mg · kg⁻¹,是 MU 处理的 2.73 倍,MUN₃处理固定态铵释放量最高,为 19.09

表 1 小麦分蘖期至成熟期不同处理土壤-植物系统各氮库的动态变化

Table 1 Dynamics of N pools in soil-plant system under different treatments from tillering stage to maturity stage of wheat (mg · kg⁻¹)

| 处理 Treatment | 微生物固持氮 Microbial immobilization N | 微生物生物量氮矿化 MBN mineralization | 黏土矿物固定氮 Fixed N by clay | 固定态铵释放 FN release | 氮损失 N loss | 作物吸收的氮量 Plant absorbed N |
|------------------|---|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|--------------------------------|
| CK | 91.43 | 16.33 | 189.07 | 1.01 | 4.30 | 2.03 |
| U | 50.57 | 39.38 | 195.13 | 7.78 | 6.83 | 2.45 |
| MU | 58.01 | 34.23 | 206.44 | 10.62 | 4.37 | 2.54 |
| MUN ₁ | 92.24 | 59.09 | 205.03 | 13.43 | 4.09 | 2.72 |
| MUN ₂ | 99.62 | 93.32 | 201.05 | 12.73 | 4.71 | 2.54 |
| MUN ₃ | 108.43 | 89.17 | 205.74 | 19.09 | 5.07 | 2.53 |

CK: 对照 Control; U: 尿素 Urea; MU: 缓释肥 N: 普通尿素 N = 1 : 1 Slow-release fertilizer-N: urea-N = 1 : 1; MUN₁: MU+2.5%eNAM; MUN₂: MU+5%eNAM; MUN₃: MU+7.5%eNAM. MBN: 微生物生物量氮 Microbial biomass N; FN: 固定态铵 Fixed NH₄⁺-N. 下同 The same below.

表2 各处理多元线性回归参数及其显著性水平
Table 2 Parameters and their significance levels of the multivariable linear regressions for different treatments

| 处理 Treatment | 截距 Intercept | NH ₄ ⁺ -N | MBN | FN | R ² |
|------------------|-----------------|---------------------------------|----------|----------|----------------|
| CK | -62.094 * | 1.815 ** | -0.052 * | 0.241 | 0.989 ** |
| U | -156.937 | 2.327 ** | -0.310 * | 0.668 | 0.710 ** |
| MU | 154.595 | 1.834 ** | 0.051 | -0.893 | 0.819 ** |
| MUN ₁ | -5.631 | 2.864 ** | 0.034 | -0.305 | 0.986 ** |
| MUN ₂ | 52.351 * | 1.151 ** | 0.438 ** | -0.355 * | 0.993 ** |
| MUN ₃ | 3.292 | 2.054 ** | -0.028 | -0.157 | 0.974 ** |

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. $n = 15$.下同 The same below.

mg · kg⁻¹,是MU处理的1.80倍.施肥也显著增加了植株吸氮量,其中MUN₁处理最高,为2.72 mg · kg⁻¹,且其氮素损失量最少,为4.09 mg · kg⁻¹.

为明确NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、微生物生物量氮和固定态铵4个氮库间的关系,以NO₃⁻-N库为因变量,其他3个氮库为自变量进行多元线性回归分析(表2)和通径分析(表3).结果表明,多数处理下NH₄⁺-N库对NO₃⁻-N库的影响极显著,而微生物生物量氮

表3 各个处理的NH₄⁺-N、微生物生物量氮和固定态铵对NO₃⁻-N的通径分析

Table 3 Analysis of direct effects of NH₄⁺-N, MBN and FN to NO₃⁻-N and indirect effects of MBN through NH₄⁺-N, FN through NH₄⁺-N or MBN on NO₃⁻-N

| 处理 Treatment | 直接效应 Direct effect | | | 间接效应 Indirect effect | | |
|------------------|---------------------------------|----------|----------|---|---|-------------------------------------|
| | NH ₄ ⁺ -N | MBN | FN | 微生物生物量氮通过 NH ₄ ⁺ -N MBN through NH ₄ ⁺ -N | 固定态铵通过 NH ₄ ⁺ -N FN through NH ₄ ⁺ -N | 固定态铵通过 微生物生物量氮 FN through MBN |
| U | 0.974 ** | -0.297 * | 0.165 | 0.796 | -0.130 | -0.085 |
| MU | 0.897 ** | 0.041 * | -0.264 | 0.514 | 0.034 | -0.010 |
| MUN ₁ | 0.969 ** | 0.032 | -0.078 | 0.749 | 0.238 | -0.003 |
| MUN ₂ | 0.641 ** | 0.506 ** | -0.104 * | 0.313 | 0.004 | 0.277 |
| MUN ₃ | 1.010 ** | -0.039 | -0.043 | 0.716 | 0.505 | -0.029 |

2.5 掺混氮肥配施抑制剂对氮素利用率和小麦产量的影响

施肥显著提高了小麦籽粒产量和秸秆产量,各施肥处理比CK处理分别提高了25.7%~68.0%和36.1%~75.8%,而MU和U处理间差异不显著.相比MU处理,添加NAM处理的小麦籽粒产量显著提高了21.5%~31.6%,秸秆产量显著提高了15.9%~29.1%,其中,MUN₂处理的籽粒产量最高,为12522 kg · hm⁻²,MUN₁处理的秸秆产量最高,为13586 kg · hm⁻².施肥也显著提高了小麦的总吸氮量,但MU、MUN₁、MUN₂和MUN₃处理间差异不显著;MUN₁和MUN₂处理的氮素利用率比MU处理分别显著提高了8.1%和13.5%,其中,MUN₂处理的氮素利用率最高,为42.8%(表4).

库和固定态铵库只在MUN₂处理有显著影响,因此微生物生物量氮库和固定态铵库通过间接效应影响NO₃⁻-N.

由表3可知,在U处理中,固定态铵同时通过NH₄⁺-N和微生物生物量氮的间接效应影响NO₃⁻-N,表现为通径系数相近(-0.130和-0.085).微生物生物量氮主要通过NH₄⁺-N的间接效应影响NO₃⁻-N(0.796).对比U处理,MU处理的NH₄⁺-N对NO₃⁻-N的直接影响和微生物生物量氮通过NH₄⁺-N对NO₃⁻-N的间接影响减弱,且固定态铵通过NH₄⁺-N和微生物生物量对NO₃⁻-N的间接影响也减弱,而固定态铵对NO₃⁻-N的直接影响增强;除MUN₃外,其他处理均减弱了NH₄⁺-N对NO₃⁻-N的直接效应,通径系数大小顺序为MUN₁>MU>MUN₂;添加NAM均减弱了固定态铵的直接效应,而MUN₂和MUN₃处理增强了固定态铵通过NH₄⁺-N对NO₃⁻-N的间接作用.

表4 各处理的籽粒产量、秸秆产量、总吸氮量和氮素利用率
Table 4 Grain yield, straw yield, total nitrogen uptake and nitrogen use efficiency (NUE) under different treatments

| 处理 Treatment | 籽粒产量 Grain yield (kg · hm ⁻²) | 秸秆产量 Straw yield (kg · hm ⁻²) | 总吸氮量 Total N uptake (kg · hm ⁻²) | 氮素利用率 NUE (%) |
|------------------|---|---|--|---------------------|
| CK | 7454c | 7729d | 289b | - |
| U | 9370b | 11744bc | 371a | 28.8c |
| MU | 9518b | 10522c | 372a | 29.3c |
| MUN ₁ | 12522a | 13586a | 391a | 37.4ab |
| MUN ₂ | 11563a | 13025ab | 402a | 42.8a |
| MUN ₃ | 11701a | 12190ab | 379a | 32.4bc |

NUE; Nitrogen use efficiency. 同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$) Different lowercase letters within a column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

3 讨 论

施用掺混氮肥处理(MU)降低了土壤NH₄⁺-N

含量,并延迟了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值出现的时间,是因为施用缓释肥可以延缓肥料中氮素的释放,而添加氮肥抑制剂可以进一步减缓氮素的水解和硝化进程^[17]. 整个生长季,各处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,说明释放至土壤的氮素主要以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式存在.分蘖期以后, MU 和添加 NAM 处理的矿质氮含量逐渐高于 U 处理,前期氮素释放的少,在小麦生长旺盛时期保持较高水平,且添加 NAM 处理的矿质氮平均含量小于 MU 处理,有利于提高肥料氮的有效性,对氮素在土壤中的转化进行全过程调节^[22].其他学者的研究也得出利用脲酶抑制剂和硝化抑制剂可以很好地抑制土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化作用,减小 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的过量淋失,提高氮肥利用率^[23-24].

普通尿素处理(U)的微生物生物量氮一直处于下降趋势,可能是施入的尿素水解后降低了土壤的 C/N,微生物固氮能力降低所致^[7].在缓释掺混肥中添加 NAM 使微生物生物量氮的峰值增大且提前出现,分蘖期以后进入固定态铵库的氮素显著提高,可能是硝化抑制剂抑制了硝化过程,使铵态和酰胺态氮更长时间地保存在土壤中,有利于微生物固持和黏土矿物固定^[25].

矿质态氮是作物吸收利用的主要形态^[26],微生物生物量氮库和固定态铵库是土壤氮素重要的暂时贮存库和缓冲库^[27].施入土壤后的氮素可通过微生物固持和黏土矿物固定保存于土壤中,之后逐渐矿化和释放出来供作物吸收利用.对比 U 处理, MU 和添加 NAM 处理的固定态铵和微生物生物量氮的峰值均有所提高,同时分蘖期到成熟期微生物生物量氮和固定态铵的释放量也增加,并且随抑制剂添加量的增加而增加,表明 NAM 的添加可以提高微生物生物量氮库和固定态铵库的有效性.本试验中各处理的固定态铵平均含量均大于微生物生物量氮,是因为固定态铵的临时保存氮的作用强于微生物生物量氮库^[28].分蘖期,添加 NAM 处理的微生物生物量氮平均为 MU 处理的 2.18 倍,而固定态铵的含量平均减少 6.3%,说明添加 NAM 可以加剧前期微生物和黏土矿物对 NH_4^+ 的“竞争”作用,且微生物对氮的固持作用大于固定态铵^[29].马强^[12]研究也发现,添加硝化和脲酶抑制剂可以显著提高固定态铵库和微生物生物量氮库在保氮和供氮中的作用.同时,固定态铵通过 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的间接作用显著大于通过微生物生物量氮的间接作用,表明添加 NAM 提高了硝化作用对固定态铵释放的贡献,而固定态铵

释放的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是作物吸收的主要氮源形式^[30],这有利于提高作物后期有效氮的供应,表现为添加 NAM 处理显著提高了籽粒产量和秸秆产量,同时也提高了氮素利用率,也可能是因为抑制剂对氮素转化过程中的水解和硝化过程产生了双重抑制^[31],调节氮素在微生物生物量氮库和固定态铵库中的分配,优化氮素供给的时效性,为提高产量奠定了基础^[12].

4 结 论

综上所述,施用缓释掺混氮肥可以延缓氮素的释放,配施 NAM 进一步抑制了氮素的水解和硝化过程, MUN_2 、 MUN_3 处理土壤矿质氮峰值出现时间延迟,在拔节期出现并保持较高水平;添加 NAM 提高了微生物生物量氮库和固定态铵库的有效性,增强了微生物生物量氮和固定态铵在供氮中的作用,同时,增大了硝化作用对固定态铵释放的贡献,实现了对氮素释放及氮在土壤中转化的双重调控,进而提高了小麦籽粒产量和氮肥利用率.

参考文献

- [1] Fischer G, Winiwarter W, Ermolieva T, *et al.* Integrated modeling framework for assessment and mitigation of nitrogen pollution from agriculture: Concept and case study for China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, **136**: 116-124
- [2] Luan J (栾江), Qiu H-G (仇焕广), Jing Y (井月), *et al.* Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2013, **28** (11): 1869-1878 (in Chinese)
- [3] Zheng W, Liu Z, Zhang M, *et al.* Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. *Field Crops Research*, 2017, **205**: 106-115
- [4] Wang W (王薇), Li D-P (李东坡), Wang S (王术), *et al.* Nutrient release and transformation characteristics of slow/controlled release urea fertilizers and response of urease in paddy soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24** (2): 116-118 (in Chinese)
- [5] Xiao Q (肖强), Zhang F-D (张夫道), Wang Y-J (王玉军), *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by nano-materials on nitrogen recovery and loss of crops. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14** (4): 779-785 (in Chinese)
- [6] He J-Z (贺纪正), Zhang L-M (张丽梅). Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation. *Microbiology China* (微生物学通报), 2013, **40** (1): 98-108 (in Chinese)
- [7] Tang Y-X (唐玉霞), Jia S-L (贾树龙), Meng C-X

- (孟春香), *et al.* A summary of soil microbial biomass nitrogen. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2002, **10**(2): 76–78 (in Chinese)
- [8] Wang S-P (王淑平), Zhou G-S (周广胜), Sun C-Z (孙长占), *et al.* The dynamics of soil microbial biomass nitrogen and its biological availability. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2003, **9**(1): 87–90 (in Chinese)
- [9] Perelo LW, Munch JC. Microbial immobilisation and turnover of ^{13}C labelled substrates in two arable soils under field and laboratory conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **38**: 912–922
- [10] Drury CF, Voroney RP, Beauchamp EG. Availability of NH_4^+ -N to microorganisms and the soil internal N cycle. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**: 165–169
- [11] Juang TC, Wang MK, Chen HJ, *et al.* Ammonium fixation by surface soils and clays. *Soil Science*, 2001, **166**: 345–352
- [12] Ma Q (马强). Responses of Fertilizer N Immobilization and Fixation to Inhibitors and Organic Carbon Additions. PhD Thesis. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2015 (in Chinese)
- [13] Elmacı ÖL, Seçer M, Erdemir O, *et al.* Ammonium fixation properties of some arable soils from the Aegean region of Turkey. *European Journal of Agronomy*, 2002, **17**: 199–208
- [14] Kaori M, Naoki M. Dynamics of clay-fixed ammonium as a sink or source of exchangeable ammonium in a paddy soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, **57**: 751–758
- [15] Dong Y (董燕), Wang Z-Y (王正银). Effects of slow/controlled release compound fertilizers on the forms of soil nitrogen. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(24): 6707–6714 (in Chinese)
- [16] Sun L (孙磊). Application effect of NAM fertilizer additive in continuous cropping soybean. *Heilongjiang Agricultural Sciences* (黑龙江农业科学), 2017(6): 21–23 (in Chinese)
- [17] Wang L-L (王玲莉), Gu H-J (古慧娟), Shi Y-L (石元亮), *et al.* Soil nitrogen transformation and corn yield as affected by combination of urea and fertilizer additive NAM in Sanjiang Plain of China. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2012(2): 34–38 (in Chinese)
- [18] Brookes PC, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, **17**: 837–842
- [19] Silva JA. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. 5. Fixed ammonium. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, **30**: 587
- [20] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agrochemistry Analysis. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Lu R-K (鲁如坤). Chemical Analysis Method of Agricultural Soil. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [22] Zhang Y (张炎), Hu W (胡伟), Li Q-J (李青军), *et al.* Application of stabilized fertilizer additive NAM in processing tomatoes. *Rural Science and Technology* (农村科技), 2014(11): 34–35 (in Chinese)
- [23] Ni X-J (倪秀菊), Li Y-Z (李玉中), Xu C-Y (徐春英), *et al.* Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2009, **25**(12): 145–149 (in Chinese)
- [24] Yao Y-K (姚云柯), Xu W-H (徐卫红), Zhou H (周豪), *et al.* Effect of special slow release fertilizer containing urease/nitrification inhibitor on nutrient uptake of tomato and soil fertility. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2018, **31**(4): 748–753 (in Chinese)
- [25] Johnson DW, Cheng W, Burke IC. Biotic and abiotic nitrogen retention in a variety of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 1503–1514
- [26] Lu C, Zhang X, Chen X, *et al.* Fixation of labeled ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ and its subsequent release in black soil of northeast China over consecutive crop cultivation. *Soil and Tillage Research*, 2010, **106**: 329–334
- [27] Jiao X-G (焦晓光), Liang W-J (梁文举), Chen L-J (陈利军), *et al.* Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(10): 1903–1906 (in Chinese)
- [28] Juma NG, Paul EA. Effect of a nitrification inhibitor on N immobilization and release of ^{15}N from nonexchangeable ammonium and microbial biomass. *Canadian Journal of Soil Science*, 1983, **63**: 167–175
- [29] Trehan SP. Immobilisation of $^{15}\text{NH}_4^+$ in three soils by chemical and biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 1021–1027
- [30] Sandra J, Torgny N, Kerstin HD. Nitrogen compounds in soil solutions of agricultural land. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 2325–2330
- [31] Sun A-W (孙爱文), Shi Y-L (石元亮), Zhu Z-F (朱志锋), *et al.* Effect of combination of thiourea and inhibitors on soil urea-N transformation and corn yield. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(4): 481–486 (in Chinese)

作者简介 白杨, 女, 1995年生, 硕士研究生. 主要从事环境友好型包膜材料和包膜肥料研究. E-mail: baiyang50411@163.com

责任编辑 张凤丽