

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.033

引用格式:许瀚予,徐振朋,李佳兴,等.减量分期施氮和硝化抑制剂对饲用燕麦氮肥利用率的影响[J].草地学报,2026,34(7):2721—2729

XU Han-yu, XU Zhen-peng, LI Jia-xing, et al. Effects of Reduced-staged Nitrogen Application and Nitrification Inhibitors on the Nitrogen Use Efficiency of Forage Oats[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2721—2729

减量分期施氮和硝化抑制剂对饲用燕麦氮肥利用率的影响

许瀚予¹, 徐振朋², 李佳兴¹, 孙文龙¹, 胡美婷¹, 高凯^{1*}, 安海波^{1*}

(1. 内蒙古民族大学草业学院, 内蒙古通辽 028000; 2. 乌兰察布市农林科学研究所, 内蒙古乌兰察布 012000)

摘要:为探讨分期施氮和添加硝化抑制剂(3,4-Dimethylpyrazole Phosphate, DMPP)对饲用燕麦(*Avena sativa* L.)氮素吸收利用和产量的影响,本研究以饲用燕麦为试验材料,设置7个处理:不施氮(CK);常规施氮 105 kg·hm⁻²(N₁₀₅), 210 kg·hm⁻²(N₂₁₀)和 300 kg·hm⁻²(N₃₀₀);减量优化施氮 168 kg·hm⁻²(O₁₆₈);减量优化施氮配施 DMPP (O₁₆₈+D, O₁₄₄+D),测定饲用燕麦氮肥利用特征及影响因素。结果表明,相较于常规施氮处理,O₁₆₈+D处理下的产量最高,为 7412.13 kg·hm⁻²,显著高于常规施氮处理($P<0.05$),燕麦植株氮素吸收量、氮肥农学效率和氮肥利用率相比 N₂₁₀处理分别提高了 4.90%, 48.51% 和 6.44%。因此,在科尔沁风沙土条件下,通过氮肥减量分期施用结合 DMPP 进行优化处理,能够起到增产和提高饲用燕麦氮肥利用率的作用,研究结果为科尔沁沙地饲用燕麦增产和氮肥合理施用提供了理论依据。

关键词:饲用燕麦;硝化抑制剂;氮肥施用量;氮肥利用率;产量

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2721-09

Effects of Reduced-staged Nitrogen Application and Nitrification Inhibitors on the Nitrogen Use Efficiency of Forage Oats

XU Han-yu¹, XU Zhen-peng², LI Jia-xing¹, SUN Wen-long¹, HU Mei-ting¹, GAO Kai^{1*}, AN Hai-bo^{1*}

(1. College of Grassland Science, University of Inner Mongolia Mizu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;

2. Ulanqab Agricultural and Forestry Science Institute, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China)

Abstract: To investigate the effects of staged nitrogen (N) application combined with the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrogen uptake, utilization, and yield of forage oat (*Avena sativa* L.), a field experiment was conducted with seven N fertilizer treatments: no N application (CK), conventional N application (105 kg·hm⁻², N₁₀₅; 210 kg·hm⁻², N₂₁₀; 300 kg·hm⁻², N₃₀₀), reduced-staged optimized N application (168 kg·hm⁻², O₁₆₈), and reduced-staged optimized N application combined with DMPP (O₁₆₈+D, O₁₄₄+D). The results showed that compared with conventional N application, the O₁₆₈+D treatment achieved the highest yield of 7412.13 kg·hm⁻², which was significantly higher than that of under conventional N application ($P<0.05$). Compared to the N₂₁₀ treatment, the oat plant nitrogen uptake, nitrogen agronomic efficiency, and nitrogen use efficiency increased by 4.90%, 48.51%, and 6.44% in O₁₆₈+D treatment, respectively. Therefore, under the condition of Horqin aeolian sandy soil, the optimized treatment-combining reduced-staged application of N with DMPP can increase the yield and improve the N use efficiency of forage oat. These findings provide a theoretical basis for enhancing the yield of forage oat and optimizing N fertilizer application in the Horqin Sandy Land.

收稿日期:2025-09-09;修回日期:2025-10-26

基金项目:内蒙古民族大学博士科研启动基金项目(BS612);内蒙古农牧业青年创新基金项目(2023QNJJN12);内蒙古自然科学基金项目(2021BS03017)资助

作者简介:许瀚予(2000-),女,汉族,吉林吉林人,硕士研究生,主要从事饲草生产与管理方面的研究,E-mail:1710093274@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:gaokai555@126.com;360918566@qq.com

Key words: Forage oats; Nitrification inhibitor; Nitrogen fertilizer application rate; Nitrogen use efficiency; Yield

氮素(Nitrogen)是植物生长的必需营养元素之一,合理施用氮肥是提高农作物产量及品质的常用手段之一^[1]。我国作为世界上最大的农业生产国和氮肥消耗国,氮肥消耗量大,而氮肥利用率却低于发达国家^[2-3]。氮肥不合理利用不仅会造成氮素损失导致成本增加,还会引发环境污染^[4]。在传统农业生产过程中,为提高作物产量,往往一次施用过量的氮肥,大量施用的氮短时间内不能被植物有效的吸收利用,以气态形式(NH_3 , N_2 , N_2O)进入大气和水生态系统。其中,氨挥发(NH_3)是氮肥损失的主要途径之一,造成土地富营养化和水污染,进而导致农作物的氮利用效率偏低(30%~50%)^[5]。研究表明,中国农业氨挥发是土壤氮素损失的重要途径之一,因农业活动而导致的氨挥发占我国大气氨排放总量的80%^[6]。因此在当今全球环境问题日益严峻的背景下,如何提高氮肥的利用率,降低氮素损失,是农业可持续发展首要解决的问题。

大量研究证实了少量多次施氮和添加氮肥增效剂能够提高氮肥利用率,减少氮损失^[7-8],其中少量多次施氮能够更好的平衡作物不同时期氮素需求与氮素供应间的关系,从而提高氮素吸收效率^[9]。添加氮肥增效剂可以延缓氮素在土壤中的存留时间,如硝化抑制剂可以抑制土壤中硝化作用的发生,将铵态氮保持在较低的硝化速率下,从而减少硝酸盐的形成和淋失^[10]。杨自超等^[11]研究表明,在氮肥中添加硝化抑制剂可以有效抑制铵态氮向硝态氮的转化,提升土壤中铵态氮含量,促进根系对铵态氮的吸收,提高氮素的利用效率。而脲酶抑制剂则通过抑制脲酶活性,减少尿素分解过程中氨的挥发和流失、延长氮供应时间等方面发挥作用^[12]。Abalos^[13]和Wang等^[14]通过meta分析指出不同类型或组合的氮肥增效剂能够提高饲草或作物的产量和氮肥利用率。可见,氮肥增效剂对于提高农业生产效益、保障粮食安全以及推动农业可持续发展意义非凡。

饲用燕麦(*Avena sativa* L.)是一种粮饲兼用的重要杂粮作物,耐寒抗旱性强,适口性好,生育期短,可做优质青干草,是畜牧业发展的优质饲料来源之一,也是科尔沁沙地地区苜蓿倒茬轮作的首选牧草,燕麦种植规模接近10 000 hm^2 ^[15]。近年来受畜牧业发展以及相关政策的推动,饲用燕麦的种植面积呈逐渐增加的趋势,其高效生产策略对于保障畜牧业的发展具有重要意义。在内蒙古东部科尔沁地区,

土壤类型大多为风沙土,保肥能力差,这使得施入土壤中的氮肥更容易流失^[16]。大量研究证明该地区施用氮肥可以有效促进饲用燕麦生长,提高饲用燕麦产量^[17-19],高效合理的氮肥施用策略对于提升饲草产量和区域生态环境保护具有重要意义。因此,本研究通过设置不同氮肥施用方案探讨分期施用和配施硝化抑制剂对饲用燕麦产量和氮素吸收特性的影响,提出适合饲用燕麦生产的施氮方式,为科尔沁地区饲草高效生产,减少氮素损失提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在内蒙古民族大学农牧业科技示范园区(43°38' N, 122°04' E, 海拔高度在178 m左右,属于温带大陆性季风气候),年平均气温6.4℃,极端最低气温-30.9℃,年日照时数为2700~3100 h。无霜期150 d左右。年平均降水量400 mm左右,降水主要集中在7—8月份。试验地土壤为风砂土,基础养分含量为:全氮0.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷0.39 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机碳4.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷5.44 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮11.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH值为7.6。

1.2 试验材料

供试饲用燕麦品种为‘蒙饲燕1号’(*Avena sativa* L. ‘Mengsiyan No. 1’),由乌兰察布农林科学研究所提供,氮肥为尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, 46%)。分别采用过磷酸钙(P_2O_5 , 12%)和氯化钾(K_2O , 60%)作为基肥,施用量以纯 P_2O_5 和 K_2O 计,分别为80 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。硝化抑制剂主要成分为3,4-二甲基吡唑磷酸盐(3,4-Dimethylpyrazole Phosphate, CAS号:202842-98-6, DMPP)。

1.3 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设置7个氮肥处理:不施氮(CK)、常规施氮(N_{105} , N_{210} 和 N_{300})、减量优化施氮(O_{168})和减量优化施氮配施DMPP($\text{O}_{168}+\text{D}$, $\text{O}_{144}+\text{D}$),设置4个区组,共28个小区。其中,常规施氮(N)是采用30%基肥+70%拔节期追肥的施氮方式,优化施氮(O)是在 N_{210} 基础上降低施氮量,并采用12.5%基肥+50%分蘖期追肥+37.5%拔节期追肥的施氮方式,追肥方式为撒施,DMPP

(D)添加量为施氮量的 2%,施肥前与尿素充分混匀 基肥、分蘖期和拔节期施肥时间分别为 5 月 1 日,6 月 14 日和 7 月 5 日。后共同施入,具体施氮量和施氮频次信息见表 1。

表 1 各处理氮肥施用时间与用量

Table 1 The application time and amount of nitrogen fertilizer in each treatment

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer/(kg·hm ⁻²)	追肥 Topdressing/(kg·hm ⁻²)		总施氮量 Total nitrogen application rates/(kg·hm ⁻²)
		分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	
CK	0	0	0	0
N ₁₀₅	31.5	0	73.5	105.0
N ₂₁₀	63.0	0	147.0	210.0
N ₃₀₀	90.0	0	210.0	300.0
O ₁₆₈	21.0	84.0	63.0	168.0
O ₁₆₈ +D	21.0	84.0	63.0	168.0
O ₁₄₄ +D	18.0	72.0	54.0	144.0

注:处理中字母 N 代表 30% 基肥+70% 拔节期追肥的常规施氮方式,O 代表 12.5% 基肥+50% 分蘖期追肥+37.5% 拔节期追肥的优化施氮方式,D 代表硝化抑制剂 DMPP

Note: In the treatment, the letter N represents the conventional fertilization method of 30 % base fertilizer + 70% topdressing, O represents the optimized fertilization method of 12.5% base fertilizer + 50% is applied during the tillering stage + 37.5% is applied during the jointing stage, and D represents DMPP

小区面积为 19.25 m²(3.5 m×5.5 m),小区间隔离带宽 1 m,播量为 105 kg·hm⁻²,播深 3~4 cm。播种方式为条播,行距 30 cm,每个小区播 11 行,于 2024 年 5 月 1 日播种,灌溉方式为喷灌,人工去除杂草。

1.4 样品的采集与测定方法

(1) 产量与植物氮含量测定

干草产量:各小区随机设置 3 个 1×1 m²样方,齐地面刈割测定鲜草产量,样品经 65℃烘干 48 h 后称取干重,换算干重产量(kg·hm⁻²)。

植物氮含量测定:烘干样品粉碎后过 0.25 mm 筛,准确称取 0.1 g 置于消煮管中,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法于 370℃高温消化,定容后用凯氏定氮仪(上海纤检仪器有限公司 KDN-19C)测定消化液中的氮素含量,计算植株全氮含量^[20]。

(2) 叶面积与叶绿素参数测定

叶面积测定:在燕麦拔节期,每个小区随机选取 20 片旗叶叶片,带回实验室用 Easy Leaf Area 软件测定面积^[21]。

叶绿素测定:随机选取上述叶片 0.2 g,剪碎后

$$\text{氮肥利用率}(\%) = \left(\frac{\text{施氮区植株地上部氮积累量} - \text{对照区植株地上部氮积累量}}{\text{施氮量}} \right) \times 100\%$$

(2)

$$\text{氮素吸收效率}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{成熟期植株氮素积累量}}{\text{施氮量}}$$

(3)

$$\text{植株氮素吸收量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{产量} \times \text{植株氮含量}$$

(4)

采用丙酮乙醇混合液(丙酮:乙醇=1:1)浸提法测定叶绿素含量^[22]。

(3) 土壤样品采集与测定

土壤样品采集:在燕麦收获期,使用直径 2.5 cm 土钻在每个小区随机设置 3 个样点采集 0~15 cm 土壤样品,混合均匀后过 2 mm 土壤筛备用。

土壤无机氮:称取 5 g 鲜土样品置于震荡瓶中,用 50 mL 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提,采用靛酚蓝比色法测定并计算硝态氮和铵态氮含量^[23]。

土壤全氮:土样风干后过 0.15 mm 土筛,称取 1 g 土样置于消煮管中,采用浓硫酸消煮法于 360~410℃高温消化,定容后用凯氏定氮仪(上海纤检仪器有限公司 KDN-19C)测定消化液中的氮素含量,计算土壤全氮含量^[20]。

(4) 植株氮素吸收利用参数计算

氮素利用率的计算参考段连学等公式计算^[24],各指标公式如下:

$$\text{氮肥农学效率}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{施氮区作物产量} - \text{对照区作物产量}}{\text{施氮量}}$$

(1)

1.5 数据处理与分析

运用 Excel 2019 整理试验数据,通过 IBM SPSS 27.0 软件进行正态性检验和方差齐性检验,必要时对数据进行 log 或开平方转换以符合正态分布,通过单因素方差分析探讨不同处理间的差异

显著性, Duncan法进行显著性标记, 通过 Origin 2021作图。通过 R 4. 4. 3 软件进行 Pearson 相关分析和主成分分析探讨饲用燕麦产量对不同氮肥调控方式的响应规律。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对饲用燕麦产量的影响

由图1所示饲用燕麦产量在 $O_{168}+D$ 处理最高, 与 O_{168} , $O_{144}+D$ 和 N_{300} 处理无显著差异, 但显著高于 N_{210} , N_{105} 和 CK 处理 ($P<0.05$)。各处理下饲用燕麦产量大小排序为: $O_{168}+D>O_{168}>O_{144}+D>N_{300}>N_{210}>N_{105}>CK$ 。

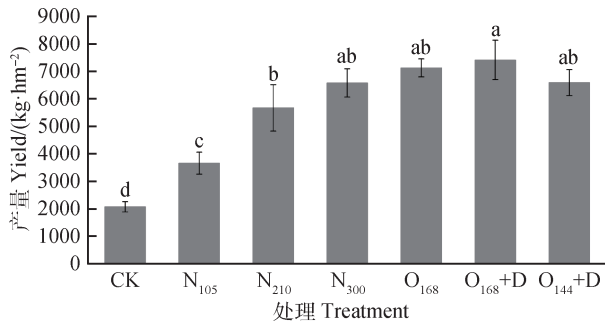


图1 不同施氮处理对饲用燕麦产量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on oat yield

注:不同小写字母表示处理间存在差异显著 ($P<0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below

2.2 不同施氮处理对饲用燕麦叶片面积和光合色素的影响

由图2所示,饲用燕麦叶面积在 O_{168} 和 $O_{144}+D$ 处理下显著高于 N_{105} 和 CK 处理 ($P<0.05$), 但与其他处理间无显著差异。饲用燕麦叶面积在不同处理下的大小排序为: $O_{168}>O_{144}+D>O_{168}+D>N_{300}>N_{210}>N_{105}>CK$ 。

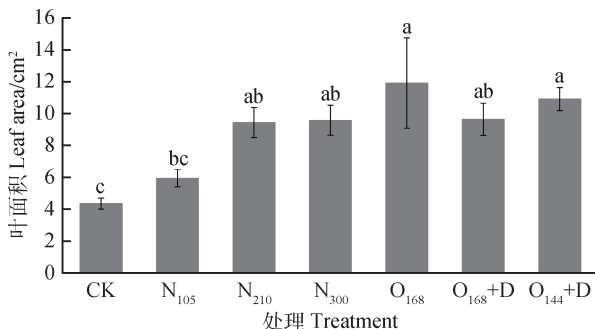


图2 不同处理对饲用燕麦叶片面积的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on leaf area of oats

由图3所示,与CK处理相比,施氮显著提高了3种光合色素含量 ($P<0.05$), 叶绿素a和叶绿素b含量在 O_{168} 处理显著高于 N_{300} , N_{105} 和 CK 处理, 与 N_{210} , $O_{168}+D$ 和 $O_{144}+D$ 处理间无显著差异 (图3A)。类胡萝卜素含量在 O_{168} 处理时达最大值, 与 $O_{168}+D$ 和 $O_{144}+D$ 处理间无显著差异, 但均高于其他处理 (图3B)。

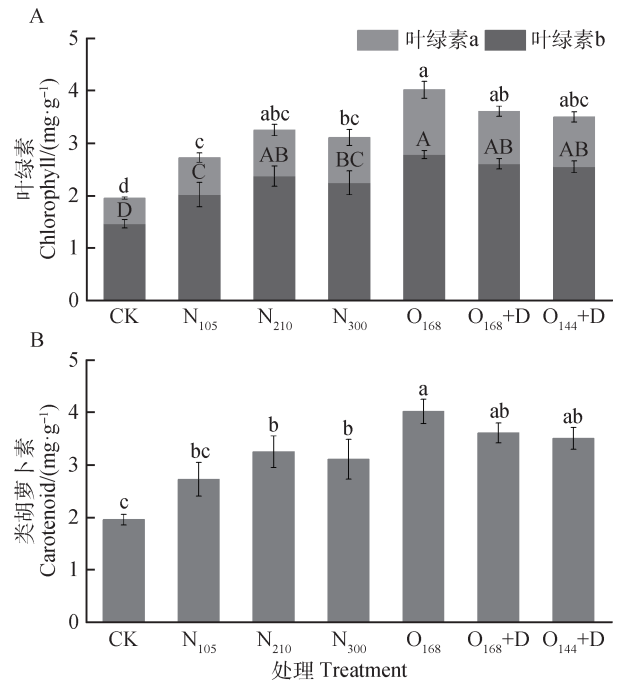


图3 不同处理对饲用燕麦光合色素含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on chlorophyll content of oats

注:不同大写字母表示处理间存在差异显著 ($P<0.05$)。下同

Note: Different uppercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below

2.3 不同施氮处理对饲用燕麦植株氮含量的影响

由图4所示,施氮显著提高了饲用燕麦植株氮含量 ($P<0.05$), 在 N_{300} 处理下显著高于优化施氮处理

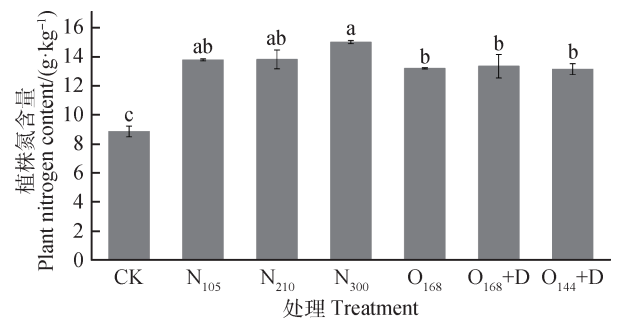


图4 不同处理对饲用燕麦植株氮含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on total nitrogen content of oat plants

和CK,但与N₁₀₅和N₂₁₀处理间无显著差异。整体上看,优化施氮处理O₁₆₈,O₁₆₈+D和O₁₄₄+D处理的氮素含量低于常规施氮处理。

2.4 不同施氮处理对饲用燕麦氮肥利用率的影响

如表2所示,不同处理对饲用燕麦的氮素吸收量和氮肥农学效率有显著影响($P<0.05$),其中氮素吸收量在N₃₀₀和O₁₆₈+D处理下相对较高,与O₁₆₈,O₁₄₄+

D和N₂₁₀处理无显著差异,但显著高于N₁₀₅和CK处理,其中O₁₆₈+D比N₂₁₀处理提高了4.90%。氮肥农学效率在添加硝化抑制剂的O₁₆₈+D和O₁₄₄+D处理较高,与O₁₆₈,N₂₁₀处理无显著差异,但显著高于N₁₀₅和N₃₀₀处理。整体上看,氮肥利用率和氮素吸收效率在N₁₀₅,O₁₆₈+D和O₁₄₄+D处理较高,高于O₁₆₈,N₂₁₀和N₃₀₀处理,其中氮肥利用率O₁₆₈+D比N₂₁₀处理提高了6.44%,但处理间差异未达到显著水平。

表 2 不同氮处理对饲用燕麦氮素吸收利用的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on nitrogen absorption and utilization of oats

处理 Treatment	植株氮素吸收量 (Plant nitrogen uptake, Nuptake) / (kg·hm ⁻²)	氮肥农学效率 (Nitrogen agronomic efficiency, NAE) / (kg·kg ⁻¹)	氮肥利用率 (Nitrogen use efficiency, NUE) / %	氮素吸收效率 (Nitrogen uptake efficiency, NUpE) / (kg·kg ⁻¹)
CK	18.22±1.33 ^c			
N ₁₀₅	50.37±5.29 ^b	15.13±3.82 ^{bc}	18.7±1.84 ^a	0.48±0.05 ^a
N ₂₁₀	79.55±14.9 ^a	17.13±4.02 ^{abc}	15.21±3.76 ^a	0.38±0.07 ^a
N ₃₀₀	98.78±8.05 ^a	15.02±1.71 ^c	14.51±1.26 ^a	0.33±0.03 ^a
O ₁₆₈	94.11±4.15 ^a	24.07±1.56 ^{ab}	16.31±0.68 ^a	0.45±0.02 ^a
O ₁₆₈ +D	98.72±11.22 ^a	25.44±3.41 ^a	17.36±3.46 ^a	0.47±0.05 ^a
O ₁₄₄ +D	86.99±8.05 ^a	25.09±2.63 ^a	17.59±2.40 ^a	0.48±0.04 ^a

注:同列不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

2.5 不同施氮处理对饲用燕麦地土壤氮含量的影响

如图5所示,土壤全氮含量在N₃₀₀和CK处理显著低于其他施氮处理($P<0.05$)。

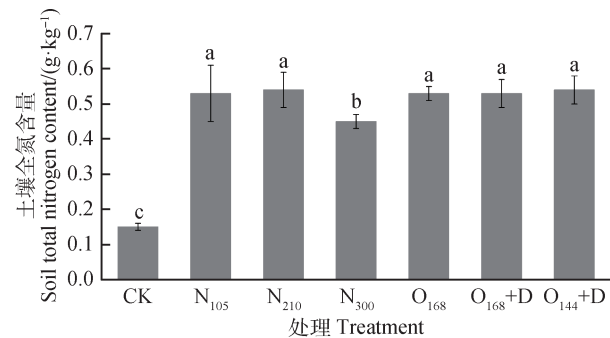


图 5 不同处理对土壤全氮含量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil total nitrogen content

如图6所示,土壤铵态氮含量在O₁₆₈和N₁₀₅处理较高,显著高于N₃₀₀,O₁₄₄+D,N₂₁₀,O₁₆₈+D和CK处理($P<0.05$),硝态氮含量在N₁₀₅处理显著高于其他处理($P<0.05),在N₃₀₀,O₁₆₈,N₂₁₀以及O₁₄₄+D处理间无显著差异,但显著高于O₁₆₈+D和CK($P<0.05$)。$

2.6 饲用燕麦产量、氮素利用及与土壤氮含量关系分析

如图7所示,饲用燕麦产量和植株氮素吸收量

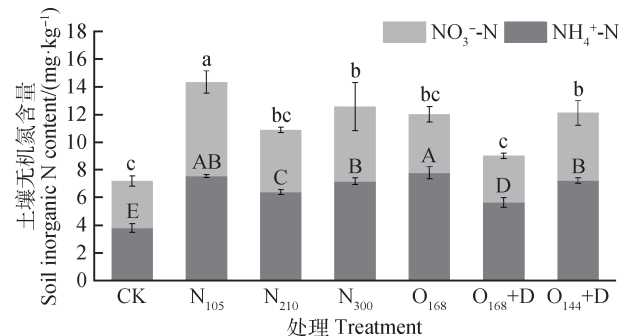


图 6 不同处理对土壤无机氮含量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on soil inorganic nitrogen content

与土壤全氮含量和3种光合色素含量呈显著正相关关系,土壤全氮含量与土壤铵态氮、叶面积、植株氮含量和3种光合色素间存在显著正相关关系,土壤铵态氮含量与植株全氮含量显著正相关关系。

如图8所示,对施氮处理下饲用燕麦产量、植物和土壤参数进行主成分分析,结果表明第一和第二排序轴分别解释了总变异的39.1%和20.1%,贡献率为59.2%。不同氮肥处理主要分布在第一排序轴上,整体上看优化施氮处理具有较高的氮素吸收与利用、产量和光合色素相关参数,而常规施氮则与土壤无机氮关系较为密切。O₁₆₈+D和O₁₆₈处理具有较高的产量、氮素吸收量以及氮肥农学效率,较低的土壤无机氮含量。

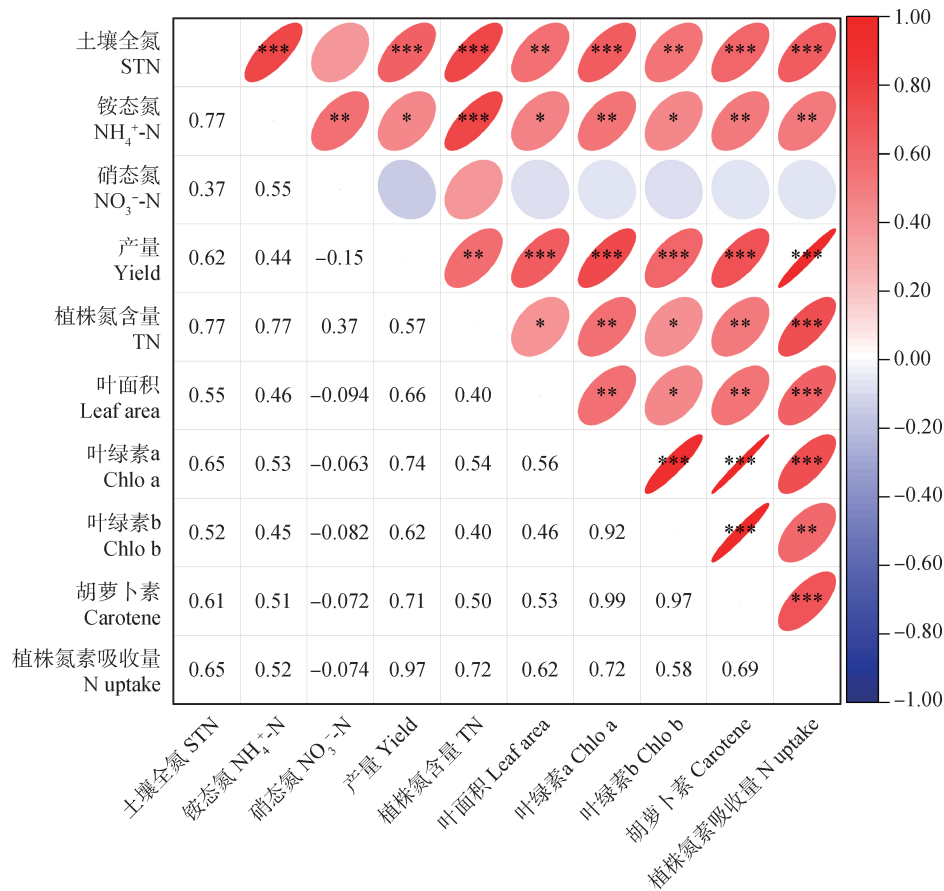


图 7 不同处理下饲用燕麦产量、氮素利用及与土壤氮含量关系分析

Fig. 7 The analysis of the relationship between forage oat yield, nitrogen utilization, and soil nitrogen content under different treatments
注:红色表示正相关,蓝色表示负相关;*,**和***表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 或 $P<0.001$ 具有显著相关关系

Note: Red indicates positive correlation and blue indicates negative correlation; *, ** and *** indicate significant correlations at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$

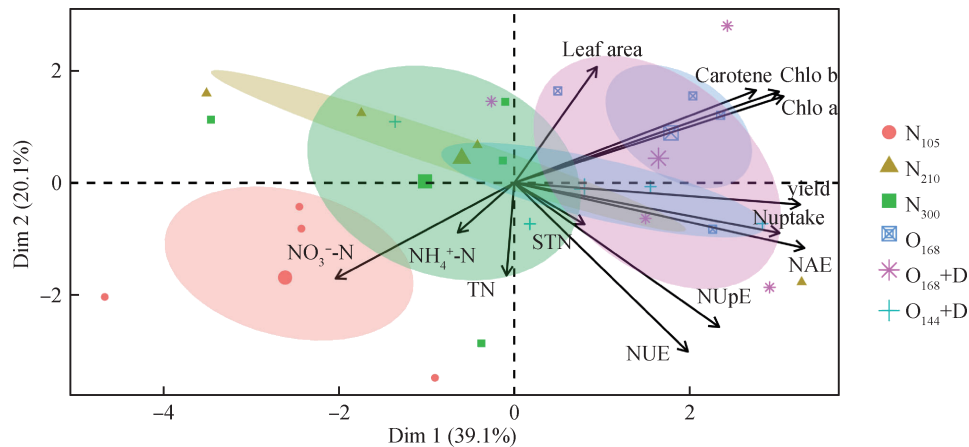


图 8 不同处理饲用燕麦产量、氮肥利用和土壤氮素主成分分析排序图

Fig. 8 Principal component analysis (PCA) ordination of oat yield, nitrogen use efficiency, and soil nitrogen under different treatments

注:STN为土壤全氮,NH₄⁺-N为土壤铵态氮,NO₃⁻-N为土壤硝态氮、yield为产量、TN为植株全氮、Leaf area为叶面积、Chlo a为叶绿素a、Chlo b为叶绿素b、Carotene为胡萝卜素、Nuptake为植株氮素吸收量、NAE为氮肥农学效率、NUE为氮肥利用率、NUpE为氮素吸收效率

Note: STN is soil total nitrogen, NH₄⁺-N is soil ammonium nitrogen, NO₃⁻-N is soil nitrate nitrogen, yield is yield, TN is plant total nitrogen, Leaf area is leaf area, Chlo a is chlorophyll a, Chlo b is chlorophyll b, carotene is carotene, Nuptake is plant nitrogen uptake, NAE is nitrogen agronomic efficiency, NUE is nitrogen use efficiency, NUpE is nitrogen uptake efficiency

3 讨论

氮素是植物生长发育所需的重要元素,植物对氮素的吸收,主要以无机氮为主,同时可吸收低分子态的有机氮,而氮肥施入土壤后,可能会通过淋溶^[25]或以气体形式(氨挥发、氧化亚氮排放)损失^[6]。有研究表明,尿素施用后在土壤中可能通过 N_2O 和 NH_3 的形式损失到空气中,损失量可达26.62%^[26]。段连学等^[24]在高寒地区探讨了氮肥减量分期施用对饲用燕麦生物量及氮肥利用的影响,结果表明减量25%分期施用相比于常规一次性施入氮肥能够有效减少氮素损失,氮肥利用率提高了26.07%,高于本研究的6.44%,可能与抑制剂的添加、施氮量和施肥方式不同有关。本研究发现常规施氮 N_{300} 处理相比于 O_{168} 处理并未提高产量,说明多量少次施氮会造成氮肥利用率低,更多的氮素可能通过其他形式损失到环境中。通过氮肥分期施用进行优化施氮提高了饲用燕麦的叶面积和光合色素的含量,通过 O_{168} 处理进行分期施氮的产量相比于 N_{210} 处理和过量的 N_{300} 常规施氮处理,产量分别提高了25.7%和8.3%,说明少量多次的优化施氮方式提高了饲用燕麦的产量。这与田永雷等^[27]在科尔沁沙地种植饲用燕麦的研究结果一致,即分期施氮可以有效提高饲用燕麦氮肥利用率和产量。优化施氮通过分期调控,更好地匹配了饲用燕麦不同生育期的氮素需求与氮素吸收偏好,马小龙等^[28]的研究表明,采用基肥30%+拔节期追肥70%的氮肥后移方式,促进了饲用燕麦的生长发育,提高了饲用燕麦的各项生长指标和产量。Cui等^[29]通过对豆科和禾本科植物氮肥偏好的研究指出,饲用燕麦在生育早期偏好吸收铵态氮而在后期偏好吸收硝态氮,本研究中的施氮方式均是在饲用燕麦生育早期(拔节期)完成80%(优化施氮)或100%(常规施氮)的施氮量,其中优化施氮处理采用12.5%基肥+50%分蘖期+37.5%拔节期的施氮方式,相比30%基肥+70%追肥的常规施氮方式具有较高的土壤铵态氮/硝态氮比值,相对较低的土壤无机氮总量,更好地促进了饲用燕麦氮素吸收与生育期的同步,降低了铵态氮转化为其他形式氮素的可能性,减少了大量氮素在土壤中的存留时间和损失。

DMPP是一种有机磷酸盐化合物^[30],它可以抑制铵态氮转化为硝态氮的生物转化过程,延长铵态氮在土壤中存在的时间^[7]前人通过对高粱、玉米、小

麦等研究也证实了添加DMPP能够提高产量和氮肥利用率^[31-33]。本研究中饲用燕麦在优化施氮处理下的氮肥利用率均高于常规施氮处理,且添加硝化抑制剂DMPP更具优势, $O_{168}+D$ 处理相比于优化施氮 O_{168} 处理和常规施氮 N_{210} 和 N_{300} 处理均显著提高了产量,说明添加硝化抑制剂DMPP对饲用燕麦产量形成具有促进作用。 $O_{168}+D$ 处理植株氮素吸收量与 O_{168} 和 N_{300} 处理相当,其氮肥农学效率相比 O_{168} 处理提升了5.7%(表2),其具有相对较低的土壤无机氮总量和较高的铵态氮:硝态氮,表明在优化施氮的基础上添加硝化抑制剂对土壤中硝化作用具有抑制作用,同时促进饲用燕麦氮素吸收并提高产量。Dong等^[34]和肖宇等^[35]通过对棉花和小麦的研究表明,后期氮素供应能够延缓叶片衰老,提高叶绿素含量和叶面积指数,进而促进产量的增加。相关性分析和主成分分析结果表明,氮肥利用率和产量与植物氮素吸收量、饲用燕麦叶面积和光合色素含量的变化密切相关,优化施氮处理下的叶面积和光合色素含量均高于常规施氮处理,说明优化施氮能够提高光能的截获能力和光能的转化效率,进而提高产量,证实了上述观点。因此,在保证产量不变的基础上,减少总施氮量,在饲用燕麦生长发育的关键时期进行分期施用氮肥可以满足饲用燕麦生长需求,可有效减少饲用燕麦生长前期施氮过剩,后期氮肥不足的问题。

4 结论

通过田间试验证实了减量分期施氮和添加DMPP的优化处理可实现饲用燕麦减氮不减产的目标,相比于常规施氮(N_{210}),减量20%分期施用并添加DMPP可以显著提升饲用燕麦产量,在此方案下产量达到最高值7412.13 kg·hm⁻²,植株氮素吸收量和氮肥利用率相比常规施氮(N_{210})提高4.90%和6.44%。因此,在科尔沁沙地燕麦生产中,分期施用并添加DMPP为该地区饲用燕麦增产和降低氮素损失的适宜施氮方式。

参考文献

- [1] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795
- JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4):783-795

- [2] 任科宇,段英华,徐明岗,等.施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J].中国农业科学,2019,52(17):2983-2996
REN K Y, DUAN Y H, XU M G, et al. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in china: a meta-analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(17):2983-2996
- [3] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,2:192-197
JU X T, ZHANG F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2003, 2:192-197
- [4] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,1:1-6
ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 1:1-6
- [5] KLIMASMITH I M, KENT A D. Micromanaging the nitrogen cycle in agroecosystems[J]. Trends in Microbiology, 2022, 30(11):1045-1055
- [6] 刘学军,沙志鹏,宋宇,等.我国大气氮的排放特征、减排技术与政策建议[J].环境科学研究,2021,34(1):149-157
LIU X J, SHA Z P, SONG Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1):149-157
- [7] 康丽霞,罗维贵,侯振安,等.硝化抑制剂影响中国农田氧化亚氮排放、主要作物产量及氮肥利用率的Meta分析[J].中国农学通报,2024,40(32):107-115
KANG L X, LUO W G, HOU Z A, et al. Effects of nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions, main crop yield and nitrogen use efficiency in cropland in china: a meta-analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(32):107-115
- [8] 陈海波,陈娟,杜爱华,等.硝化抑制剂提高农田氮肥利用率[J].农业装备技术,2019,45(4):32-34
CHEN H B, CHEN J, DU A H, et al. Nitrification inhibitors improve nitrogen use efficiency in farmland [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2019, 45(4):32-34
- [9] 袁伟玲,崔磊,梅时勇,等.提高作物氮肥利用率的技术措施[J].现代农业科技,2013,5:244,250
YUAN W L, CUI L, MEI S Y, et al. Technology of increasing nitrogen use efficiency for crops[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, 5:244, 250
- [10] 油伦成,李东坡,崔磊,等.不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(12):2113-2121
YOU L C, LI D P, CUI L, et al. Effects of different nitrification inhibitor combinations on the transformation of ammonium nitrogen in black soil and cinnamon soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(12):2113-2121
- [11] 杨自超,任孟伟,袁方方,等.硝化抑制剂对作物根际土壤pH及肥料利用率的影响[J].肥料与健康,2025,52(3):16-19
YANG Z C, REN M W, YUAN F F, et al. The Effect of nitrification inhibitor on crop rhizosphere soil pH and fertilizer utilization rate[J]. Fertilizer & Health, 2025, 52(3):16-19
- [12] 胡佳玉,张晶,孔波,等.氮肥增效剂的应用与展望[J].肥料与健康,2023,50(1):1-13
HU J Y, ZHANG J, KONG B, et al. Application and prospect of nitrogen fertilizer synergists[J]. Fertilizer & Health, 2023, 50(1):1-13
- [13] ABALOS D, JEFFERY S, SANZ-COBEN A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 189:136-144
- [14] WANG W, LI Y, WANG W, et al. Global meta-analysis of individual and combined nitrogen inhibitors: enhancing plant productivity and reducing environmental losses [J]. Global Change Biology, 2024, 30(12):e70007
- [15] 刘泽宇,刘罡,张玉霞,等.氮肥用量和混播比例对麦豆混播草地饲草产量及种间关系的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(5):109-117
LIU Z Y, LIU G, ZHANG Y X, et al. Effects of nitrogen fertilizer application and mixing ratio on grass forage yield of oat-pea forage crops interspecific relationships [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5):109-117
- [16] 曹雯婕,李玉强,陈银萍,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征[J].应用生态学报,2022,33(12):3312-3320
CAO W J, LI Y Q, CHEN Y P, et al. Soil stoichiometric characteristics under different land use types in the Horqin Sandy Land, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12):3312-3320
- [17] PAL V, GILL R, SINGH R. Impact of nitrogen application on fodder quality and yield parameters of oats: a review [J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(5):1429-1431
- [18] 王乐,张玉霞,于华荣,等.氮肥对沙地燕麦生长特性及产量的影响[J].草业科学,2017,34(7):1516-1521
WANG L, ZHANG Y X, YU H R, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on growth characteristics and yield of oats in sandy land [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(7):1516-1521
- [19] 张玉霞,王鑫,张庆昕,等.施氮水平对沙地生境下不同饲用燕麦品种干物质积累及氮素吸收利用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(4):93-99,107
ZHANG Y X, WANG X, ZHANG Q X, et al. Effects of nitrogen application level on dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization of different forage oat in sandy land habitat [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(4):93-99, 107
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:42-48,267-268
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:42-48, 267-268
- [21] EASLON H M, BLOOM A J. Easy leaf area: automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area [J]. Applications in Plant Sciences, 2014, 2(7):1400033

- [22] 郝建军,康宗利,于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:68
HAO J J, KANG Z L, YU Y. Plant physiology experimental technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 68
- [23] SIMS G K, ELLSWORTH T R, MULVANEY R L. Microscale determination of inorganic nitrogen in water and soil extracts[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26(1-2): 303-316
- [24] 段连学,马祥,琚泽亮,等. 高寒地区氮肥减量分期施用对燕麦生物量及氮肥利用率的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3185-3193
DUAN L X, MA X, JU Z L, et al. Impact of reduced and split nitrogen fertilization on oat biomass and nitrogen use efficiency in alpine regions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3185-3193
- [25] 段永康,杨海燕,吴文龙,等. 植物氮素吸收、转运和同化的分子机制[J]. 福建农业学报, 2022, 37(4): 547-554
DUAN Y K, YANG H Y, WU W L, et al. Molecular mechanisms of nitrogen absorption, transport, and assimilation in plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37(4): 547-554
- [26] ZHANG Y M, CHEN D, ZHANG J B, et al. Ammonia volatilization and denitrification losses from an irrigated maize-wheat rotation field in the north china plain[J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 533-540
- [27] 田永雷,张玉霞,朱爱民,等. 施氮对科尔沁沙地饲用燕麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 草原与草坪, 2018, 38(5): 54-58
TIAN Y L, ZHANG Y X, ZHU A M, et al. Effect of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of forage oat in Horqin sandy land[J]. Grassland and Turf, 2018, 38(5): 54-58
- [28] 马小龙,马祥,琚泽亮,等. 氮肥减施与施氮时期对高寒区燕麦光合特性及产量的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3215-3224
MA X L, MA X, JU Z L, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction and nitroge application period on photosynthetic characteristics and yield of oat in alpine regions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3215-3224
- [29] CUI J, YU C, QIAO N, et al. Plant preference for NH_4^+ versus NO_3^- at different growth stages in an alpine agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2017, 201: 192-199
- [30] THERS H, PETERSEN SO, ELSGAARD L. DMPP reduced nitrification, but not annual N_2O emissions from mineral fertilizer applied to oilseed rape on a sandy loam soil[J]. GCB Bioenergy, 2019, 11(12): 1396-1407
- [31] 王佳旭,张飞,张旷野,等. 减氮增施 DMPP 对高粱氮素吸收与利用的影响[J]. 作物杂志, 2024, (1): 126-131
WANG J X, ZHANG F, ZHANG K Y, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizers and increasing dmpp on nitrogen absorption and utilization in sorghum[J]. Crops, 2024, (1): 126-131
- [32] 阚建鸾,王晓云,苏建平,等. 不同氮肥抑制剂对小麦产量、土壤肥力、氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(5): 69-74
KAN J L, WANG X Y, SU J P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer inhibitors on wheat yield, soil fertility and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(5): 69-74
- [33] 张梦莹. NBPT 和 DMPP 及其组合对旱作小麦氮素利用的影响[D]. 甘肃:甘肃农业大学, 2021: 52-53
ZHANG M Y. Twonitrogen fertilizer synergists and their combinations for dry wheat Effects of nitrogen use [D]. Gansu: Gansu Agricultural University, 2021: 52-53
- [34] DONG H, LI W, ENEJI A E, et al. Nitrogen rate and plant density effects on yield and late-season leaf senescence of cotton raised on a saline field [J]. Field Crops Research, 2012, 126(1): 137-144
- [35] 肖宇,徐婧,牛翠云,等. 缓释氮和速效氮配施对旱地小麦光合特性、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(6): 111-118
XIAO Y, XU J, NIU C Y, et al. Effects of combined application of slow-release nitrogen and quick-available nitrogen on photosynthetic characteristics, yield and quality of dryland wheat [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 111-118

(责任编辑 付 宸)