

不同施肥方式对土壤有机氮矿化和小麦产量的影响

刘东华,晁晓燕,马建辉,陈慧平,贺云霞,李春喜

(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

摘要:为研究不同施肥方式对豫北农田壤质潮土有机氮矿化特征和小麦产量的影响,选取河南省获嘉县进行大田试验,并采用室内试验相结合的方法,研究不施肥(CK),单施化肥(NF),减氮20%+80%有机肥(NOF),单施有机肥(OF)处理下土壤养分和小麦产量的变化及其影响因素.结果表明:施肥能显著影响土壤铵态氮含量、硝态氮含量和小麦产量,与CK相比,NF、NOF和OF分别提高了铵态氮含量、硝态氮含量和小麦产量7.73%、16.35%和8.65%,40.06%、53.21%和45.83%,19.51%、26.83%和15.95%.不同施肥处理均能显著增加土壤有机氮累积矿化量(N_t)、矿化速率常数(K_m)和有机氮潜在矿化势(N_0),与NF、OF处理相比,NOF处理效果最优.分析表明,土壤有机氮潜在矿化势及矿化率主要和土壤全氮、硝态氮存在显著正相关关系,NOF处理能最大程度推进土壤氮素矿化进程,增加土壤无机氮含量,提高土壤供氮能力,对农田土壤氮素高效利用和小麦产量提升有着重要的作用.

关键词:施肥方式;有机氮矿化;氮素累积量;小麦产量

中图分类号:S158.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)02-0095-07

土壤为作物生长发育提供必需的水肥气热环境,是农业生产中首要考虑的因素^[1],而氮素在土壤中扮演着核心角色,直接影响农作物的生长发育、产量和品质^[2].作物生长所需要的氮素主要来源于肥料和土壤,土壤中95%以上的氮素以有机氮形式存在,有机氮需要在微生物作用下矿化成无机氮才能被作物吸收利用,从而更好地发挥土壤氮素的有效性^[3].土壤氮素矿化过程主要受肥料类型、施肥方式、土壤性质和环境条件等因素的共同影响^[4].目前我国在农业生产中的化肥施用量显著高于世界平均水平,化肥的过量施用产生的无机氮在短期内无法被作物及时吸收利用,多数会通过氨挥发、径流、硝化等途径损失,导致土壤板结、酸化,减弱土壤生物活性,导致化肥利用率低,造成严重的资源浪费和环境污染^[5].研究表明,化肥在土壤中通常无法长期保留,肥效短,消损快,而有机肥料所含养分全面且释放缓慢,其中的养分能与土壤颗粒结合形成复合物,在土壤中长期保存,持续地为土壤提供大量有机质,改善土壤结构,提高土壤保水保肥能力^[6].有机无机肥配施可以提高土壤有机氮比例,增加微生物的数量和活性,减少氮素损失,从而提高氮肥利用效率,有利于植物生长发育^[7-8].

以往试验大多针对施肥对田间土壤理化性质及氮素利用率的影响或者单独在室内进行培养试验研究施肥对土壤氮矿化过程的影响,很少将室内试验和大田试验同时进行分析.因此,本研究以华北平原壤质潮土为研究对象,采用间歇淋洗通气培养法和大田试验同时进行的方法,研究不同施肥方式对土壤供氮潜力及氮素矿化量的影响,以期实现氮肥利用效率和小麦产量提升,为该区域农业生产全面系统地评价土壤氮素供应能力和合理施肥提供理论依据.

收稿日期:2024-04-24;**修回日期:**2024-05-24.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2301500).

作者简介:刘东华(1988—),男,河南周口人,河南师范大学讲师,博士,研究方向为麦玉粮田水肥资源高效利用,E-mail: donghual@outlook.com.

通信作者:李春喜,河南师范大学教授,E-mail: wheat_lab@163.com.

引用本文:刘东华,晁晓燕,马建辉,等.不同施肥方式对土壤有机氮矿化和小麦产量的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(2):95-101.(Liu Donghua,Chao Xiaoyan, Ma Jianhui, et al. Effects of different fertilization methods on soil organic nitrogen mineralization and wheat yield[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(2): 95-101. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.04.24.0003.)

1 材料与方法

1.1 试验地概括

试验地点位于新乡市获嘉县东彰仪村(113°66'E, 35°26'N),属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温15.4℃,年均降水量573.4 mm,地处黄河冲积扇平原北部,土壤性质为壤质潮土。0~30 cm 土层基本性质:pH 为7.43,容重为1.43 g/cm³,阳离子交换量为12.4 cmol/kg,铵态氮为2.2 mg/kg,硝态氮为10.7 mg/kg,有机质21.7 g/kg,全氮1.04 g/kg,全磷0.61 g/kg,全钾10.4 g/kg.试验期间气象数据见附录图 S1.

1.2 试验设计

试验所用冬小麦品种为“伟隆169”,采用随机试验设计,以不施肥组(CK)为对照,设置3种不同施肥方式,即单施无机肥组(NF):施肥量为N 240 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²;有机无机肥配施组(NOF):施肥量为N 192 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²、有机菌肥1 200 kg/hm²;单施有机肥组(OF):施肥量为有机菌肥1 500 kg/hm².每个处理设置3次重复,各小区面积30 m²,共12个小区.所有肥料均作为基肥一次性施入,播种前秸秆粉碎还田.小麦生育期间,灌溉、除草、杀虫等管理措施与当地大田管理方式相同.

田间土壤样品分别在小麦越冬期(2023-02-11)、拔节期(2023-03-28)、抽穗期(2023-04-19)、灌浆期(2023-05-18)、成熟期(2023-06-04)采用5点取样法进行取样,取样时均无降雨和灌溉情况发生.剔除土壤样品中的根系以及石砾等杂质,一部分放在阴凉通风处风干,另一部分鲜土过2 mm 筛放于-4℃保存,室内土壤有机氮矿化培养试验所需要的土壤于成熟期采取.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤理化性质与小麦产量的测定

土壤pH值采用土水质量比1:2.5浸泡的方法,使用pH计测定;阳离子交换量(CEC)采用CEC-ED-TA-乙酸铵交换法以凯氏定氮仪测定;有机质含量(SOM)采用德国Elementar元素分析仪测定;全氮(TN)、全磷(TP)采用CuSO₄-K₂SO₄ H₂SO₄ 消煮,冷却过滤后用AA3连续流动分析仪测定;铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)采用1 mol/L KCl 浸提静置过滤后采用AA3连续流动分析仪测定.于小麦成熟期在每个小区随机选取3个1 m²的植株,风干后测定其穗数、穗粒数、千粒质量、地上部生物量及产量.

1.3.2 土壤有机氮矿化培养及指标测定

有机氮矿化培养采用间歇淋洗通气培养法^[9],测定培养过程中产生的铵态氮、硝态氮含量计算有机氮矿化量和矿化速率.培养前根据测定的土壤含水量,经过含水率公式换算后,准确称取15.00 g过0.25 mm筛的风干土和等量1~2 mm石英砂放于烧杯中,加水湿润使其充分混合形成良好的土砂混合物,装入50 mL有机玻璃培养管内,将样品在25℃恒温培养箱中培养,25℃预培养1周使其恢复到原来的土壤状态,之后放于35℃的人工气候培养箱中培养11周,培养过程中每天进行称重补充水分,保持土壤含水量不变.

培养第1周,第1天于2、4、6、10、14、18、24 h测定,剩余6 d内,每2 d测1次,共测3次,之后每周测1次,测量时间均选择同一时间测量,直至11周培养结束.用100 mL、0.01 mol/L CaCl₂以5~10 mL增量淋洗土壤中的起始矿质氮,然后加入25 mL无氮营养液(0.002 mol/L CaSO₄·2H₂O、2.0 mmol/L MgSO₄·7H₂O、5.0 mmol/L Ca(H₂PO₄)₂·H₂O和2.5 mmol/L K₂SO₄的混合液)多余水分在80 kPa负压下抽出.

每次淋洗后收集淋洗液,过滤后于100 mL容量瓶定容,通过AA3流动分析仪测定NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量.有机氮矿化指标计算方法如下:

$$N_t = N_0(1 - e^{-K_n t}), V_1 = N_t / N_{TN} \times 100\%$$

$$V_2 = [(V_{\text{铵态氮-结束}} + V_{\text{硝态氮-结束}}) - (V_{\text{铵态氮-起始}} + V_{\text{硝态氮-起始}})] / t,$$

式中, N_t 为 t 时间(d)内累积的矿质氮量(mg/kg), N_0 为土壤有机氮矿化势(mg/kg), t 为培养时间(d), K_n 为矿化速率常数; V_1 代表有机氮矿化率, V_2 代表净氮矿化速率(mg/(kg·d)), N_{TN} 代表矿化培养前土壤全氮含量(g/kg).

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2019 软件进行数据处理和分析,使用 SPSS 27.0.1 进行方差显著性分析(Duncan 法, $P < 0.05$),运用 Origin 2021 进行图形绘制、相关性分析以及土壤有机氮一级动力学模型拟合。

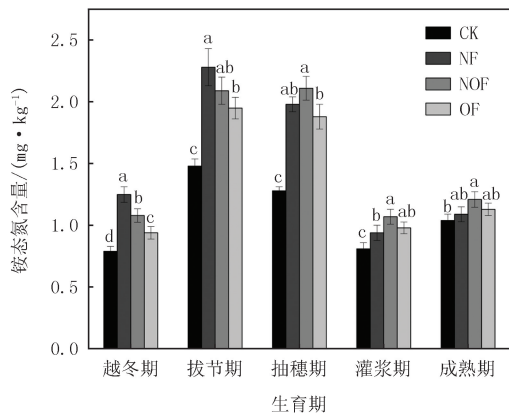
2 结果与分析

2.1 土壤铵态氮含量的动态变化

由图 1 可知,土壤铵态氮含量随着生育期的推进,呈现出先升高后降低再略微升高的变化趋势,其含量整体上的小麦拔节期达到最高值,在小麦灌浆期达到最低值。在越冬期至拔节期增速较大,增幅为 86.78%~114.29%,抽穗期至灌浆期降幅较大,降幅为 62.53%~97.57%,与 CK 相比,施肥显著提高了土壤铵态氮含量。在小麦越冬期和拔节期,NF 处理下铵态氮含量显著高于 CK、OF 处理($P < 0.05$),拔节期 NF、NOF 处理间不存在显著性差异;抽穗期及之后的生育时期,NOF 处理下土壤铵态氮含量高于 NF 处理并达到最高值,随着时间的推移,NOF、OF 处理间土壤铵态氮含量差异不显著。总体来看,NOF 处理能在小麦生育后期保持较高的土壤铵态氮含量供植物吸收利用。

2.2 土壤硝态氮含量的动态变化

由图 2 可知,土壤硝态氮含量变化趋势和铵态氮含量变化趋势存在一致性,但土壤硝态氮含量最高值出现在抽穗期,在越冬期达到最低值。在拔节期至抽穗期增速较大,增幅为 39.33%~54.07%,NF 处理下硝态氮含量增幅最大,拔节期土壤硝态氮含量在 NF、OF 处理间存在显著性差异($P < 0.05$),在抽穗期二者间不存在显著性差异;抽穗期过后,土壤硝态氮含量下降,NOF 处理下土壤硝态氮含量保持在最高值,和 NF 处理间存在显著性差异,和 OF 处理间不存在显著性差异。总体来看,NOF 处理能最大程度上提高土壤硝态氮含量,为作物生长发育提供更多的有效氮素。



注:图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平,误差线为标准误差,下同。

图1 施肥对小麦季各生育时期土壤铵态氮含量的影响

Fig.1 Effect of fertilization on soil ammonium nitrogen content at different growth stages of wheat season

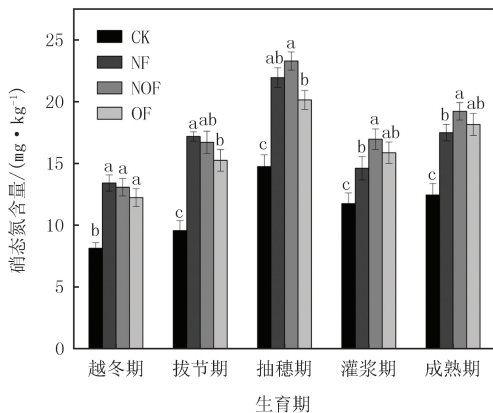


图2 施肥对小麦季各生育时期土壤硝态氮含量的影响

Fig.2 Effects of fertilization on soil nitrate nitrogen content at different growth stages of wheat season

2.3 小麦产量及构成要素对施肥的响应

由附录表 S1 可知,在施肥处理下,NOF 处理小麦千粒质量、亩穗数、产量、地上部生物量最高,其中,NOF 处理下的小麦千粒质量分别较 CK、OF 处理提高了 19.28%、14.80% ($P < 0.05$),和 NF 处理间不存在显著性差异;各处理间小麦亩穗数和小麦千粒质量变化趋势表现出相似性;小麦产量的由高到低表现为: NOF, NF, OF, CK. NOF 与 OF 处理间差异性显著 ($P < 0.05$),与 NF 处理间不存在显著性差异;穗粒数以 NF 处理下效果最好,但各处理间不存在显著性差异;NOF 处理最大程度增加了地上部生物量,NF、OF 处理间不存在显著性差异,综合看来,NOF 处理能最大程度提高小麦穗数、千粒质量和产量,从而达到作物增产的目的。

2.4 土壤有机氮矿化速率的动态变化

由图 3 可知,在室内培养的前 3 d,净氮矿化速率急剧下降,变化范围在 5.92~2.69 mg/(kg·d)之间,

NOF 处理下净氮矿化速率最高,在第 5 至 7 天呈现升高状态,之后随着培养时间的延长土壤净氮矿化速率逐渐降低,培养后期(49 至 78 d)维持在较低水平.在室内培养的前 28 d,土壤净氮矿化速率的由高到低表现为:NOF,NF,OF,CK.第 28 天之后,OF 处理下土壤净氮矿化速率逐渐高于 NF 处理.随着时间的推移,有机肥中的养分逐渐发挥作用,总体来看,有机无机肥配施能最大程度上提高土壤净氮矿化速率,加快有机氮向无机氮的转化进程.

2.5 土壤有机氮累积矿化量的动态变化

由图 4 可知,土壤有机氮累积矿化量随着时间的延长增加幅度逐渐减小,各施肥处理都能增加土壤有机氮矿化量,前 28 d 有机氮累积矿化量占到 78 d 累积矿化量的 59.77%~64.77%.在前 14 d,土壤有机氮矿化量由高到低表现为:NOF,NF,OF,CK.第 14 天之后表现为:NOF,OF,NF,CK.NF 和 OF 处理间土壤有机氮矿化量接近,NOF 处理能最大程度上增加土壤有机氮矿化量,提高土壤供氮能力.

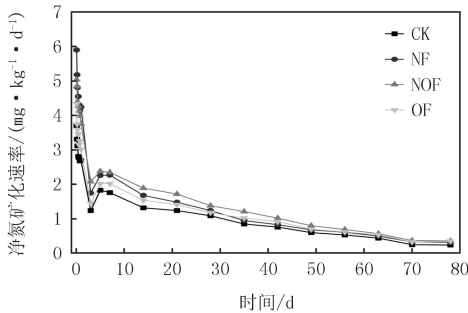


图3 土壤净氮矿化速率在不同施肥方式下随时间的变化

Fig.3 Changes of soil net nitrogen mineralization rate with time under different fertilization methods

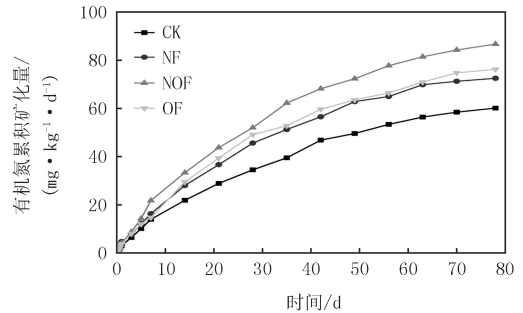


图4 土壤无机氮累积量在不同施肥方式下随时间的变化

Fig.4 Changes of soil inorganic nitrogen accumulation with time under different fertilization methods

2.6 土壤有机氮潜在矿化势的动态模型构建

土壤有机潜在氮矿化势(N_0)和矿化速率常数(K_n)是表征土壤氮素矿化特征的重要参数,分别用于衡量土壤的供氮潜力和供氮强度^[10].本研究利用一级动力学模型对有机氮矿化的实测结果进行拟合,拟合曲线和各拟合参数分别见附录图 S2 和附录表 S2,有机氮矿化率见附录表 S3.综合分析可知,不同施肥处理下土壤有机氮矿化拟合曲线的决定系数处于 0.964~0.987 之间,这表明一级动力学模型的拟合参数可以很好地反映土壤有机氮的矿化情况.各施肥处理间的 N_0 存在显著性差异($P < 0.05$),NOF 处理分别显著高于 NF、OF 处理 22.31%、16.05%,CK、OF 处理间 N_0 不存在显著性差异,NOF 处理能最大程度提高 N_0 ,增强土壤氮素的供应能力.不同施肥处理均提高了 K_n ,NF 处理下 K_n 显著高于 NOF、OF 处理($P < 0.05$),NOF、OF 处理间不存在显著性差异.不同施肥方式都能显著提高土壤有机氮矿化率,但各施肥处理间不存在显著相关关系.由此可见,NOF 处理能显著增加土壤 N_0 ,使 K_n 保持在较高水平,并提高 N_0/N_{TN} ,提高有机氮转化成无机氮的周转速率,最大程度并较为持久地为土壤提供无机氮素.

2.7 土壤有机氮矿化参数和土壤化学特性间的相关分析

由图 5 可知,pH、CEC 间存在正相关关系但不存在显著性;SOM 和 CEC 间存在极显著正相关关系($P < 0.01$),表明增加土壤有机质含量能够增加阳离子交换量,从而改善土壤缓冲性能; $N_{NH_4^+-N}$ 和 CEC、 N_{TN} 、SOM 都存在显著正相关关系; $N_{NO_3^--N}$ 和 N_{TN} 、SOM 呈显著正相关; N_0 和 N_{TN} 、 $N_{NO_3^--N}$ 存在极显著正相关关系($P < 0.05$),和 DOC 存在显著正相关关系; N_0/N_{TN} 和 N_{TN} 、 $N_{NO_3^--N}$ 呈显著正相关; K_n 与 pH、CEC、 N_{TN} 存在负相关关系,和 $N_{NH_4^+-N}$ 之间不存在相关关系,和其他指标间存在正相关关系,表明有机氮矿化势受全氮、硝态氮含量影响最大,提高土壤全氮含量能有效增强土壤供氮能力.

3 讨论

3.1 土壤无机氮含量及小麦产量对不同施肥方式的响应

农作物体内获取的氮素主要依赖于从土壤中吸收的硝态氮和铵态氮,因此这两种氮素形态在土壤中的含量是评估土壤肥力有效性的关键指标.本试验结果发现,施肥均显著增加了土壤铵态氮、硝态氮含量和作

物产量($P < 0.05$),NF 处理能最大程度增加小麦越冬期及拔节期土壤铵态氮、硝态氮含量,这可能是由于前期化肥中无机氮素的释放速率大于有机肥中有机氮素的矿化速率,NF 处理下化肥能快速释放速效氮,导致在小麦生育前期 NF 处理的氮素矿化量高于 OF 处理^[11],从而快速提高二者含量.随着生育期的推进,NOF 处理下铵态氮、硝态氮含量逐渐高于 NF 处理并达到最大值,表明有机肥肥效逐渐发挥作用,有效推进了土壤有机氮矿化进程,使土壤矿化出更多利于植物吸收的无机氮素.研究表明,施用化肥在作物生长前期能最大程度提高土壤养分含量,但易随降雨、灌溉渗透到地下,表明化学肥料见效快但累积作用不大,不能作为培肥养地的主要养分补充源^[12],而随小麦生长时期推进,有机无机肥配施逐渐发挥作用,无机肥能增加土壤无机氮及磷钾元素的含量,有机肥施用能提升土壤有机质含量并丰富微生物群落,为微生物提供充足的碳源供其利用,同时随着土壤温度的升高,二者之间的协同效应增强,更有利于加速土壤的硝化过程,从而产生更多的硝态氮供植物吸收利用^[13].

农田产量以作物产出为核心衡量指标,亩穗数、穗粒数及千粒质量等参数直接影响作物产量^[14].本研究结果表明,施肥能提高小麦产量及其构成要素,NOF 处理下效果最好.这可能是由于前期无机肥快速发挥作用为植物生长提供充足的营养,随着时间的推移,有机肥逐渐发挥肥效,增加土壤营养元素矿化量,提高了无机氮含量,在整个生育期持续地为作物生长提供必备的养分,所以能最大程度提高作物产量.OF 处理下小麦千粒质量、亩穗数、产量较 NF 处理有所降低,这可能由于单施有机肥时,土壤有效氮发挥作用需要依赖于微生物的矿化,在小麦生长高峰期,有效氮不能快速地发挥作用,同时微生物为了生长繁殖会与作物争夺养分资源,这种竞争关系会导致有效氮供给不足,进而限制小麦的产量^[15].

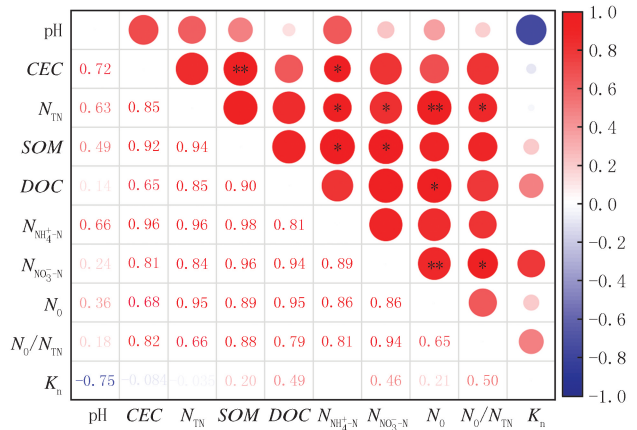
3.2 土壤有机氮矿化参数对不同施肥方式的响应

土壤氮素矿化是土壤微生物主导的生物化学过程,因此影响微生物活动的环境因素都会影响氮素矿化过程^[11].不同施肥方式能改变土壤理化性质和微生物环境,进而影响土壤氮素累积矿化量(N_t)、有机氮潜在矿化势(N_0)和矿化速率常数(K_n)^[16-17].在室内试验培养前期,土壤有机氮矿化量迅速增加,前 3 d 净氮矿化速率迅速下降,随着培养时间的延长逐渐减缓,导致有机氮累积矿化量增加缓慢.刘威等^[18]研究认为,添加有机肥处理的净氮矿化速率在整个培养期间的第 7 天达到最大值,随后表现出快速下降再缓慢下降的变化趋势,这是由于在前期培养阶段,肥料的添加为土壤带来了丰富的有机质和碳源,为矿化反应提供充足的底物,提高净氮矿化速率,但本试验因为前 3 d 取样时间间隔短,土壤中活性有机氮被快速消耗,从而使净氮矿化速率快速降低.然而在培养后期,易分解有机氮库逐渐耗尽,碳源成为了制约微生物活性的主要因素,因此矿化反应速度逐渐减缓,矿化氮累积量也逐渐降低^[19].

此外,本研究表明,与不施肥处理相比,施肥处理都能显著提高 N_0 、 K_n 和净氮矿化速率,其中 NOF 和 OF 处理对氮素矿化作用的促进效果较为明显,NOF 处理效果最好,一级动力学方程拟合参数(N_0 、 K_n)也表现出相似的结果.这是因为有机无机肥配施处理不仅可以为土壤提供充足的碳源和氮源,而且增加了微生物的数量和活性,有效促进氮矿化进程,因此能显著提高土壤 N_t 、 N_0 .而且,有研究发现,尿素添加到有机肥中可以协调微生物所适宜的碳氮比,提高微生物活性和生物量,从而增加土壤供氮潜力^[20],这也间接支持了本研究结果.

4 结 论

本研究田间和室内试验表明,施肥方式可以显著影响壤质潮土有机氮矿化过程.与单施氮肥或单施有机



注:**表示 $P < 0.01$,*表示 $P < 0.05$.

图5 土壤有机氮矿化参数和土壤化学特性间的相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil organic nitrogen mineralization parameters and soil chemical properties

肥相比,减氮 20%+80%有机肥组合可进一步提高有机氮潜在矿化势,增加有机氮累积矿化氮量,并在小麦生殖生长期维持较高的土壤养分供应能力,进而实现较高的小麦产量,因此适量减施氮肥并增施有机肥是实现土壤肥力和小麦产量协同提升的有效施肥策略.该研究结果为壤质潮土区农业生产评估土壤供氮能力及施肥决策制定提供了科学依据.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.04.24.0003).

参 考 文 献

- [1] 宋一凡,武紫君,付凯霞,等.豫东南砂姜黑土冬小麦种植区有机肥和无机氮配施组合模式选择[J].河南农业大学学报,2025(1):38-48.
SONG Y F, WU Z J, FU K X, et al. Selection of combined application mode of organic fertilizer and inorganic nitrogen in winter wheat planting area of Shajiang black soil in southeastern Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025(1): 38-48.
- [2] 张银杰,苗玉红,盛开,等.配施有机肥调控农田土壤磷素有效性研究进展[J].河南农业大学学报,2025,59(2):189-198.
ZHANG Y J, MIAO Y H, SHENG K, et al. Research progress on organic fertilizers application regulates phosphorus availability in farmland soil[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(2): 189-198.
- [3] UHART S A, ANDRADE F H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1376-1383.
- [4] 徐春燕,张倩,俞一鸣,等.有机肥替代化学氮肥对冬小麦-夏玉米产量和土壤肥力的影响[J].河南农业大学学报,2025(1):79-90.
XU C Y, ZHANG Q, YUN Y M, et al. Effects of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on winter wheat-summer maize yield and soil fertility[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025(1): 79-90.
- [5] 邵云,王岚,王鹏飞,等.不同前茬作物和施肥水平下麦田土壤不同形态无机磷含量及其对冬小麦磷累积量的贡献[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):23-31.
SHAO Y, WANG L, WANG P F, et al. Content of different fractions of soil inorganic phosphorus and their contributions to phosphorus accumulation in winter wheat with different previous crops and at different fertilizer levels[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(1): 23-31.
- [6] 张庆,胡春胜,刘彬彬,等.生物有机肥配施化肥对生菜生长和土壤环境的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023(5):725-741.
ZHANG Q, HU C S, LIU B B, et al. Influence of combined application of bioorganic fertilizer and chemical fertilizer on lettuce growth and soil environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023(5): 725-741.
- [7] 杨小东.长期施肥对三种土壤类型酶活性及硝化微生物丰度的影响[D].北京:中国农业科学院,2020.
YANG X D. Changes of Enzyme Activities and Abundance of Nitrifying Microorganism of Three Different Type Soils under Long-term Fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [8] ROS G H. Predicting soil N mineralization using organic matter fractions and soil properties: a re-analysis of literature data[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 132-135.
- [9] STANFORD G, SMITH S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3): 465-472.
- [10] 张玉玲,陈温福,虞娜,等.不同利用方式下土壤有机氮素矿化特征的研究[J].土壤通报,2013(1):52-56.
ZHANG Y L, CHEN W F, YU N, et al. Study on mineralization characteristics of soil organic nitrogen under different utilization modes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013(1): 52-56.
- [11] 田飞飞,纪鸿飞,王乐云,等.施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响[J].环境科学,2018(10):4717-4726.
TIAN F F, JI H F, WANG L Y, et al. Effects of fertilization types and hydrothermal changes on nitrogen mineralization and dynamic changes of soluble organic nitrogen in farmland soil[J]. Environmental Science, 2018(10): 4717-4726.
- [12] 赵秀东,陈晓芳,袁自然,等.有机肥替代对土壤养分的影响[J].中国农学通报,2022,38(16):74-80.
ZHAO X D, CHEN X F, YUAN Z R, et al. Organic fertilizer substitution: effects on soil nutrients[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(16): 74-80.
- [13] 冯中洲,叶泽杰,翟文露,等.长期施用生物炭对潮土理化特性和小麦产量的影响[J].河南农业大学学报,2025,59(1):49-56.
FENG Z Z, YE Z J, ZHAI W L, et al. Effects of long-term application of biochar on physicochemical properties and wheat yield in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(1): 49-56.
- [14] DADNIA M R, GHANBARPOOR M. Effect of waterlogging periods on kernel yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. Research on Crops, 2009, 10(1): 5-11.
- [15] WANG J, WANG F, DAI W, et al. Organic fertilizer made from food waste improves nitrogen mineralization by altering aggregate-associated microbial biomass and enzyme activities in Chinese paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(3): 1156-1168.
- [16] HUA W, LUO P Y, AN N, et al. Manure application increased crop yields by promoting nitrogen use efficiency in the soils of 40-year soy-

- bean-maize rotation[J].Scientific Reports,2020,10:14882.
- [17] 孙冬晔.施肥措施对红壤性水稻土可溶性有机碳组成及生物有效性的影响[D].南京:南京农业大学,2016.
SUN D Y.Effect of fertilization practice on the constitution and bioavailability of dissolved organic carbon in red paddy soil[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University,2016.
- [18] 刘威,赵园园,陈小龙,等.不同有机肥对豫中和滇西烟区土壤氮素矿化及酶活性的影响[J].河南农业科学,2023(11):85-93.
LIU W,ZHAO Y Y,CHEN X L,et al.Effects of different organic fertilizers on soil nitrogen mineralization and enzyme activity in tobacco-growing areas of central Henan and western Yunnan[J].Journal of Henan Agricultural Sciences,2023,52(11):85-93.
- [19] 李银坤,陈敏鹏,梅旭荣,等.土壤水分和氮添加对华北平原高产农田有机碳矿化的影响[J].生态学报,2014,34(14):4037-4046.
LI Y K,CHEN M P,MEI X R,et al.Effects of soil moisture and nitrogen addition on organic carbon mineralization in a high-yield cropland soil of the North China Plain[J].Acta Ecologica Sinica,2014,34(14):4037-4046.
- [20] 张璐,文石林,蔡泽江,等.有机肥与化肥不同比例配施下水稻土铵态氮释放特征[J].中国土壤与肥料,2015(4):15-22.
ZHANG L,WEN S L,CAI Z J,et al.The ammonium nitrogen release characteristic of paddy soil with mixed application of different ratios of organic and inorganic fertilizer[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2015(4):15-22.

Effects of different fertilization methods on soil organic nitrogen mineralization and wheat yield

Liu Donghua, Chao Xiaoyan, Ma Jianhui, Chen Huiping, He Yunxia, Li Chunxi

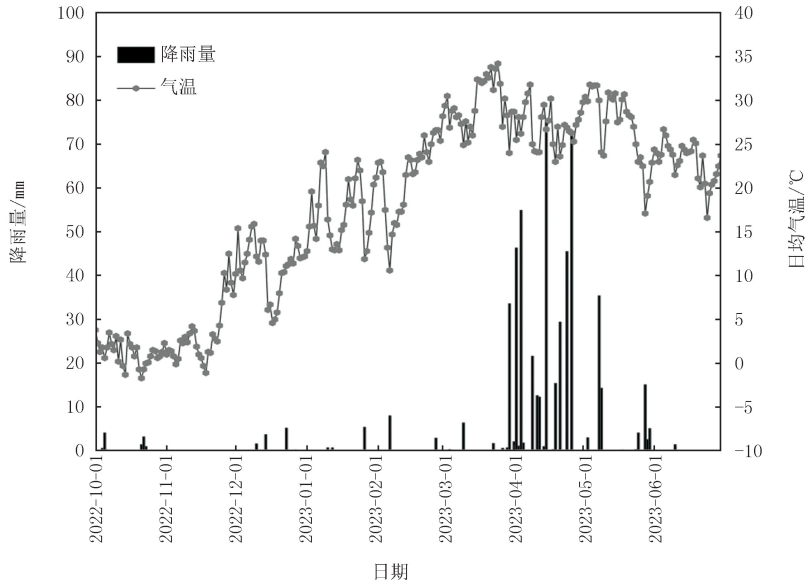
(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: To study the effects of different fertilization methods on soil organic nitrogen mineralization characteristics and wheat yield in northern Henan, a field experiment was conducted in Huojia County, Henan Province. The method combined with laboratory experiment was adopted, the changes of soil nutrients and wheat yield were studied under no fertilization(CK), single application of chemical fertilizer(NF), nitrogen reduction of 20%+80% organic fertilizer(NOF) and single application of organic fertilizer(OF). The results showed that fertilization could significantly affect soil ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content and wheat yield. Compared with CK, NF, NOF and OF increased ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content and wheat yield by 7.73%, 16.35% and 8.65%; 40.06%, 53.21% and 45.83%; 19.51%, 26.83% and 15.95%, respectively. Different fertilization treatments could significantly increase soil organic nitrogen accumulation mineralization nitrogen(N_i), mineralization rate constant(K_n) and organic nitrogen potential mineralization potential(N_0). Compared with NF and OF treatments, NOF treatment had the best effect. Correlation analysis showed that the potential mineralization potential and mineralization rate of soil organic nitrogen were significantly positively correlated with soil total nitrogen and nitrate nitrogen. Therefore, NOF treatment can promote the mineralization process of soil nitrogen to the maximum extent, increase the inorganic nitrogen content of soil, improve the nitrogen supply capacity of soil, and play an important role in the efficient use of soil nitrogen in farmland and the improvement of wheat yield.

Keywords: fertilization method; organic nitrogen mineralization; nitrogen accumulation; wheat yield

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附录



图S1 2022年10月至2023年6月中国农业科学院新乡获嘉县试验基地气象信息

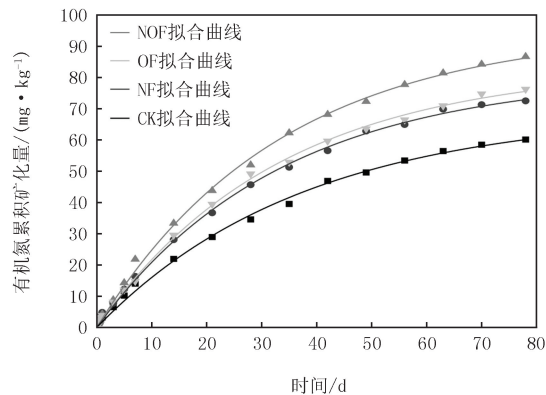
Fig.S1 Meteorological information of Huojia County test base, Xinxiang, Chinese academy of agricultural sciences, from October 2022 to June 2023

表 S1 施肥对小麦产量及构成要素的影响

Tab. S1 Effects of fertilization on yield and components of wheat

处理	千粒质量/g	亩穗数/万	穗粒数/粒	亩产量/kg	每亩地上部生物量/kg
CK	41.5 c	34.5 b	35.4 b	456.2 c	442.8 c
NF	42.5 ab	38.3 a	42.2 a	545.7 ab	495.5 b
NOF	47.5 a	39.5 a	39.4 ab	577.8 a	526.3 a
OF	43.9 b	36.5 ab	41.6 a	535.1 b	502.9 b

注:表中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平,下同。



图S2 土壤无机氮累积量在不同施肥方式下的拟合曲线

Fig.S2 The fitting curve of soil inorganic nitrogen accumulation under different fertilization methods

表 S2 土壤有机氮潜在矿化势在不同施肥方式下的一级动力学模型参数拟合

Tab. S2 First-order kinetic model parameter fitting of soil organic nitrogen potential mineralization potential under different fertilization methods

处理	$N_0/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$K_n/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	回归方程	R^2
CK	$65.12 \pm 2.72 \text{ c}$	$0.25 \pm 0.01 \text{ b}$	$N_t = 65.12(1 - e^{-0.25t})$	0.977
NF	$78.91 \pm 2.07 \text{ b}$	$0.33 \pm 0.02 \text{ a}$	$N_t = 81.55(1 - e^{-0.33t})$	0.986
NOF	$95.29 \pm 3.05 \text{ a}$	$0.26 \pm 0.01 \text{ b}$	$N_t = 95.29(1 - e^{-0.26t})$	0.977
OF	$81.51 \pm 1.96 \text{ d}$	$0.25 \pm 0.01 \text{ b}$	$N_t = 76.91(1 - e^{-0.25t})$	0.964

表 S3 不同施肥方式对土壤有机氮矿化率的影响

Tab. S3 Effects of different fertilization methods on soil organic nitrogen mineralization entropy

处理	CK	NF	NOF	OF
$(N_0/N_{\text{TN}})/\%$	9.37 b	13.48 a	12.54 a	13.24 a