

# 有机无机肥配施对西北地区不同土壤类型氮素矿化影响

段晨骁<sup>1,2</sup> 李佳蓓<sup>1,2</sup> 吴淑芳<sup>1,2</sup> 冯浩<sup>1,3</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为揭示不同施肥措施和土壤类型对我国西北地区典型农田土壤氮素矿化特征的影响,通过室内恒温好气培养法,分别研究不施肥(CK)、单施尿素(U)、单施有机肥(M)和尿素配施有机肥(U+M)施肥模式对土壤氮素矿化动态过程的影响,并对土壤累积矿化氮量进行一级动力学方程拟合及相关性分析。结果表明,施肥和土壤类型均显著影响土壤铵态氮含量、硝态氮含量和累积矿化氮量,且两者之间存在显著的交互作用。不同类型土壤累积矿化氮量和矿化速率由大到小依次为壤土、黄绵土、黄河灌溉土、灰棕漠土。与CK处理相比,不同施肥处理显著增加土壤累积矿化氮量、矿化速率常数( $k$ )和矿化势( $N_0$ ),处理间差异显著( $P < 0.05$ )。单施尿素和尿素配施有机肥处理的累积矿化氮量和矿化速率分别较CK处理增加2.83~6.71倍和3.83~7.70倍。相关分析表明,土壤累积矿化氮量与土壤有机质含量和全氮含量呈显著正相关关系。研究结果表明,有机无机肥配施处理可显著促进西北地区不同土壤类型氮素矿化,提高氮素有效性和供氮能力,有利于保持土壤矿质氮含量,对农田氮素高效利用有重要作用。

**关键词:** 有机无机肥配施; 土壤类型; 氮素矿化; 累积矿化量; 西北地区

中图分类号: S153.6; X71

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)05-0344-12

OSID:



## Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Nitrogen Mineralization in Different Soil Types in Northwest China

DUAN Chenxiao<sup>1,2</sup> LI Jiabei<sup>1,2</sup> WU Shufang<sup>1,2</sup> FENG Hao<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** An aerobic incubation method with a constant temperature was used to investigate the effects of different fertilization measures and soil types on soil nitrogen mineralization characteristics of typical farmland in Northwest China. Four fertilization treatments: no fertilizer (CK), single urea application (U), single organic fertilizer application (M), and urea combined with organic fertilizer (U+M) were set up to explore the dynamic process of nitrogen mineralization in different soil types. And the first-order kinetic equation fitting and correlation analysis were carried out on the soil accumulative mineralized nitrogen. The results showed that fertilization treatments and soil type significantly affected soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and accumulative mineralized nitrogen contents. And there were significant interactions between fertilization and soil type. The orders of accumulative mineralized nitrogen content and mineralization rate of different soil types were Lou soil, Loess soil, Yellow River irrigation soil, and Grey brown desert soil. Compared with CK treatment, different fertilization treatments significantly increased soil accumulative mineralized nitrogen, mineralization rate constant ( $k$ ) and mineralization potential ( $N_0$ ), and the differences among treatments were significant ( $P < 0.05$ ). The accumulative

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700)

作者简介: 段晨骁(1996—),男,博士生,主要从事农业水土资源利用与保护研究,E-mail: dexvayy00@163.com

通信作者: 吴淑芳(1977—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源利用与保护研究,E-mail: wsfsj@163.com

mineralized nitrogen content and mineralization rate of single urea application and urea combined with organic fertilizer were 2.83 ~ 6.71 times and 3.83 ~ 7.70 times higher than that of CK treatment, respectively. Correlation analysis showed that soil accumulative mineralized nitrogen was significantly and positively correlated with soil organic matter and total nitrogen contents. The results illustrated that combined application of organic and inorganic fertilizers could significantly promote nitrogen mineralization in different soil types in Northwest China, improve nitrogen availability and supply capacity, and help maintain soil mineral nitrogen content, which played an important role in the efficient utilization of farmland nitrogen.

**Key words:** combined application of organic and inorganic fertilizers; soil type; nitrogen mineralization; accumulative mineralized nitrogen; Northwest China

## 0 引言

氮素是影响作物生长发育和产量形成的主要营养元素之一<sup>[1]</sup>,作物获取所需要的氮素主要来源于肥料和土壤。土壤氮素95%以上以有机氮形式存在,有机氮需经过微生物的矿化作用转化为无机氮,从而被作物直接吸收利用<sup>[2]</sup>。因此,研究土壤氮素矿化过程对于深刻认识土壤供氮潜力、氮素循环过程和维持农田生态系统生产力具有重要意义<sup>[3]</sup>。土壤氮素矿化是一个复杂的生物化学过程,受到土壤温度、水分、质地、理化性质和施肥措施等多种因素的影响<sup>[3-5]</sup>。在农田生态系统中,施肥可以通过改变土壤有机氮含量和组成,影响氮素矿化过程及微生物多样性,进而提高土壤供氮水平和作物产量<sup>[6-8]</sup>。目前我国在农业生产中的氮肥(尿素)施用量显著高于世界平均水平,土壤无机氮短期内无法被作物及时吸收利用,多数通过氨挥发、径流、淋溶、硝化或反硝化等途径损失,造成严重的资源浪费和环境污染<sup>[9]</sup>。研究表明,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,提高氮素在土壤的残留率,从而减少氮素损失,提高氮肥利用效率<sup>[10-11]</sup>。有机无机肥配施处理还可以改善土壤理化性质,提高土壤活性有机氮库,缓控氮素释放过程,减少农业面源污染等<sup>[12-13]</sup>。

有机无机肥配施措施下的土壤氮素矿化特征及过程主要受有机肥类型、配施方式、土壤性质和环境条件等因素的影响<sup>[14-15]</sup>。农业生产中施用的有机肥种类繁多,来源广泛,不同有机肥的氮素释放特性存在明显差异<sup>[16]</sup>。研究发现,高碳氮比的秸秆或动物粪便与尿素配施会促进无机氮的同化,抑制土壤矿化作用和硝化作用<sup>[17]</sup>。也有研究表明,有机无机肥合理配施可以显著促进土壤氮素矿化作用,提高土壤持续稳定的供氮能力,满足作物生长发育的需求<sup>[18]</sup>。在以往的氮素矿化试验中,有机肥类型多采用畜禽粪便、作物秸秆或者生活垃圾堆肥等<sup>[4,19-20]</sup>,关于利用工农业废弃资源合成有机肥的

研究较少,该有机肥和尿素配合施用能否达到增加土壤供氮潜力、减少氮素损失和提高氮素矿化量等目的尚不明确。因此,关于有机无机肥配施对土壤氮素矿化能力的影响效应和作用机理还需要进行深入研究。土壤类型对土壤氮素矿化过程也有显著影响<sup>[21-22]</sup>。土壤类型不同导致土壤养分、持水能力、团聚体含量和孔隙特征等存在差异,进而影响土壤微生物活性和氮素矿化量<sup>[23]</sup>。以往的研究多集中在有机无机肥配施或土壤类型对土壤氮素矿化动态过程的单独影响<sup>[6,24-25]</sup>,而对于不同土壤类型下有机无机肥配施所产生的土壤氮素矿化特征和供氮能力仍有待进一步探明。

我国西北部地区干旱缺水,水土流失严重,该地区农田土壤普遍存在氮素缺乏、有机质含量低等问题,严重制约当地农业的可持续发展。因此,研究有机无机肥配施对不同土壤类型氮素矿化特性的影响对于当地农田土壤培肥和作物增产具有重要意义。本研究以我国西北地区4种典型农田土壤(塬土、黄绵土、黄河灌淤土和灰棕漠土)为研究对象,在等氮施肥的原则下,采用室内恒温好气培养法研究不同施肥措施对不同土壤类型氮素矿化特征的影响,以期为该区域农业生产中合理施用有机肥料、管理调控土壤氮素供应、提高肥料利用效率和减轻环境污染等提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤分别采自陕西省杨凌示范区西北农林科技大学节水灌溉试验站、陕西省延安市宝塔区万庄村、内蒙古自治区河套灌区曙光实验站和青海省德令哈市怀头他拉镇,采集深度为0~20 cm。陕西省杨凌示范区属于大陆性暖温带季风型半湿润气候,年平均气温为12.9℃,年平均降雨量为635.6 mm,土壤类型为塬土。陕西省延安市属于干旱半干旱气候,年平均气温为9.4℃,年平均降雨量为500 mm,土壤类型为黄绵土。内蒙古

自治区河套灌区属于典型温带大陆性气候,年平均气温为6.9℃,年平均降雨量142.1 mm,土壤类型属于黄河灌淤土。青海省德令哈市属于高原大陆性气候,年平均气温为3℃,年平均降雨量约

160 mm,土壤类型属于灰棕漠土。将采集的土样挑出动植物残体、石块和根系等,置于室内风干,磨细后过1 mm筛供矿化培养试验备用。4种供试土壤基本理化性质如表1所示。

表1 不同供试土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of different tested soils

土壤类型	颗粒组成(质量分数)/%			速效氮质量比/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷质量比/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质质量比/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮质量 分数/%	pH 值
	粘粒	粉粒	砂粒					
壤土	29.49	35.95	34.56	91.42	5.97	14.70	0.110	8.0
黄绵土	20.12	21.44	58.44	87.90	5.49	10.90	0.088	8.0
黄河灌淤土	27.78	28.30	43.92	72.08	2.56	7.65	0.060	7.7
灰棕漠土	18.85	20.17	60.98	47.46	2.12	2.88	0.036	7.2

## 1.2 试验设计

试验共设置土壤类型和施肥处理两个因素,土壤类型包括4种(壤土、黄绵土、黄河灌淤土、灰棕漠土),每种土壤类型包括4种施肥处理,分别为对照处理(不施肥,CK)、单施尿素处理(U)、单施有机肥处理(M)和尿素配施有机肥处理(U+M)。试验共16个处理,3次重复。黄河灌淤土土样含盐量为1.19 g/kg,电导率为0.38 dS/m。参照土壤盐渍化程度划分标准<sup>[26]</sup>,该土壤盐分水平(电导率)属于非盐渍化水平。前人研究表明,低盐分水平会抑制土壤氨化作用,加快硝化速率,但作用效果较小,土壤累积矿化氮量基本保持不变<sup>[14,27]</sup>。因此,本研究未考虑土壤含盐量对土壤氮素矿化作用的影响。本试验采取等氮的原则,各施肥处理施氮总量保持一致,按照1 kg干土1 g氮(全N)施加肥料,并与土壤充分混匀,以不施肥处理为空白对照。这是因为有机肥本身含有一定的氮素,如果采用等比例(有机肥占土壤质量比)、等质量(有机肥)或额外施加有机肥等粗放式施肥方式,未确保各处理在统一施氮水平下进行研究,将会影响试验数据和结论的可靠性。其中U+M处理中,有机肥和尿素的全氮含量分别占所施全氮含量的50%。试验选用的有机肥料由中国科学院水土保持研究所节水中心团队研发制作,主要以粉碎秸秆、油渣和菌渣等工农业废弃资源制成的合成有机材料。该有机肥有机质含量79.23%,全氮含量6.68%,总磷含量2.25%,总钾含量0.32%。

矿化试验在西北农林科技大学节水灌溉试验站培养室中进行,采用室内恒温好气培养法<sup>[20,28]</sup>研究土壤氮素矿化动态特征。该方法具有操作简便、快速等优点,适用于大批样品和连续培养测定,在旱地土壤氮素矿化培养的效果较好,得到国内外学者广泛应用。具体的试验步骤如下:称取过1 mm筛风干土样500 g,将土壤与肥料充分混匀后装入容量为

1 L的广口玻璃瓶,将广口玻璃瓶置于恒温培养箱中遮光培养,控制温度为25℃,添加蒸馏水调节土壤含水率为田间持水率的60%。在培养过程中,培养瓶每天通气1 h,通过称量法每3 d补充一次水分,保持培养瓶中的土壤水分含量恒定。室内好气培养试验如图1所示。在培养后第0、3、7、14、28、42、56、70、84天通过破坏性取样采集培养瓶中的土样,其中一部分土样用于测定土壤含水率,另一部分用50 mL 2.0 mol/L KCl溶液振荡浸提30 min,过滤后收集上清液测定土壤硝态氮、铵态氮含量。



图1 室内好气培养试验

Fig.1 Laboratory aerobic incubation experiment

## 1.3 测定项目与方法

土壤机械组成采用比重计法测定;土壤pH值采用电位法(水土质量比为2.5:1)测定;电导率采用电导率仪(DDS-11A型,上海济成分析仪器有限公司)测定1:5水土浸提液。供试土壤养分指标参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[29]</sup>测定:土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定。采用2.0 mol/L KCl溶液浸提后,滤液中铵态氮含量和硝态氮含量使用连续流动分析仪(AA3型,SEAL公司,德国)测定。

## 1.4 数据处理与统计分析

土壤矿质氮含量为硝态氮含量与铵态氮含量之和,土壤累积矿化氮量为培养后土壤矿质氮含量与培养前土壤矿质氮含量差值,土壤氮矿化速率为土壤累积矿化氮量除以培养时间,土壤矿化率为土壤

累积矿化氮量占土壤全氮质量百分比。

采用一级动力学方程模型拟合培养过程中土壤累积矿化氮量的动态变化,计算公式为

$$N_t = N_0(1 - e^{-kt})$$

式中  $N_t$ —— $t$  时段内的累积土壤矿化氮量,mg/kg  
 $N_0$ ——矿化势,mg/kg  
 $k$ ——氮矿化速率常数  
 $t$ ——培养时间,d

试验数据均为3个重复的平均值。使用SPSS 22.0软件对数据进行方差分析和相关性分析,用最小显著差异(LSD)法进行不同处理间差异显著性检验。使用SigmaPlot 12.5软件绘制图形和进行模型拟合。

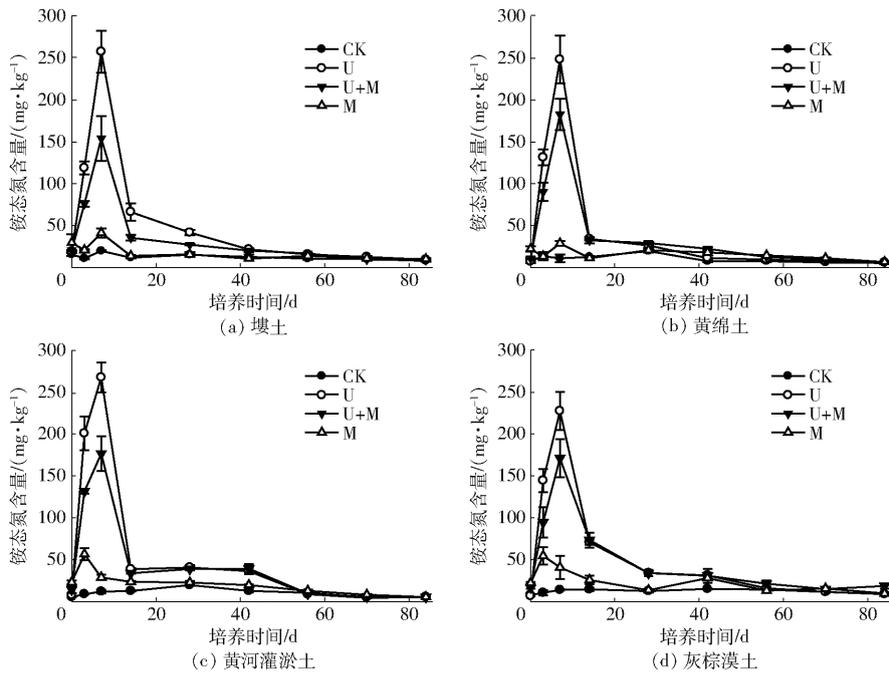


图2 不同处理土壤铵态氮含量动态变化曲线

Fig.2 Dynamic change curves of soil ammonium nitrogen content under different treatments

养后第7天达到最大值,其中U和U+M处理显著增加土壤铵态氮含量,分别较不施肥处理增加7.81~21.60倍和5.63~15.65倍。由于微生物的固持和硝化作用,土壤铵态氮含量在培养7d后迅速下降,在培养后期基本保持稳定。培养试验结束后,土壤铵态氮含量为5.20~18.55 mg/kg。双因素方差分析结果表明(表2),在整个室内好气培养试验过程中,施肥处理对土壤铵态氮含量产生极显著影响,土壤类型在除培养第7天外都对土壤铵态氮含量产生极显著影响。施肥和土壤类型之间的交互作用也极显著影响了土壤铵态氮含量(除第7天外),一定程度上说明,在氮素矿化过程中土壤铵态氮的变化与施肥以及土壤类型密切相关。

### 2.2 土壤硝态氮含量动态变化

如图3所示,在整个培养期内,土壤硝态氮含量

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤铵态氮含量动态变化

由图2可知,在矿化培养过程中,不同类型土壤铵态氮含量(质量比)的动态变化规律基本相同,均呈现先迅速增大后迅速减小再逐渐减小的趋势。总体而言,不同施肥处理较CK处理均显著增加培养初期阶段(0~7d)土壤铵态氮含量,由大到小依次为U、U+M、M、CK。在培养初始阶段,由于有机肥料中含有一定铵态氮,因此与CK和U处理相比,M和U+M处理显著提高土壤铵态氮含量。随着培养过程的进行,适宜的水热条件促使微生物和酶活性不断恢复,土壤有机氮逐渐被矿化为铵态氮,并在培

表2 土壤铵态氮含量双因素方差分析

Tab.2 Two-way analysis of variance on soil ammonium nitrogen content

培养时间/d	施肥处理(N)	土壤类型(S)	N × S
3	527.67 **	48.97 **	10.43 **
7	532.84 **	0.44	1.64
14	272.46 **	76.05 **	23.55 **
28	205.84 **	22.07 **	11.97 **
42	65.35 **	51.66 **	9.93 **
56	18.30 **	41.83 **	9.35 **
70	26.16 **	139.40 **	6.72 **
84	13.42 **	74.85 **	13.29 **

注:\*\*表示差异显著( $P < 0.01$ ),下同。

随着培养时间的延长而逐渐增大,但是不同类型土壤硝态氮含量的增加幅度不同,由大到小依次为壤土、黄绵土、黄河灌淤土、灰棕漠土。在同一土壤类

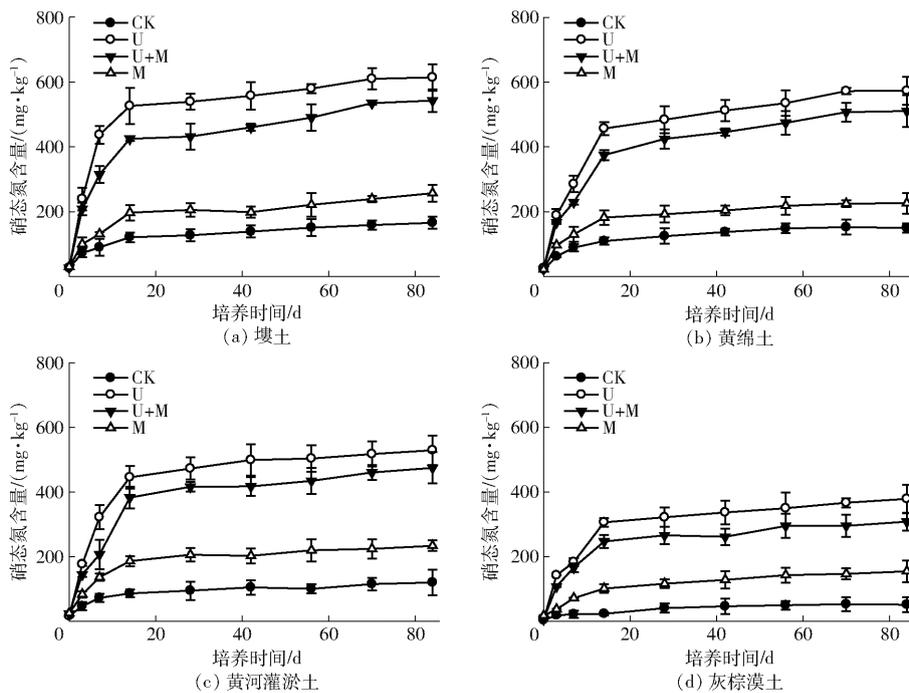


图3 不同处理土壤硝态氮含量动态变化曲线

Fig. 3 Dynamic change curves of soil nitrate nitrogen content under different treatments

型,各施肥处理在培养初始阶段土壤硝态氮含量基本相同,无显著性差异。培养后0~14 d,不同处理的土壤硝态氮含量迅速增加。与CK处理相比,不同施肥处理均显著提高土壤硝态氮含量,处理间差异显著( $P < 0.05$ ),由大到小依次为U、U+M、M、CK。培养第14天后,各处理土壤硝态氮含量缓慢增加,后期基本保持稳定状态。在矿化培养试验结束后,土壤硝态氮含量达到峰值,其中单施尿素处理的土壤硝态氮含量最高,其次为尿素配施有机肥处理。从双因素方差分析结果来看(表3),在整个室内好气培养试验过程中,施肥处理和土壤类型均对不同培养时期土壤硝态氮含量产生极显著影响( $P < 0.01$ )。施肥和土壤类型两者之间的交互作用也对氮素矿化过程中土壤硝态氮含量产生显著或极显著影响( $P < 0.05$ )。

表3 土壤硝态氮含量双因素方差分析

Tab. 3 Two-way analysis of variance on soil nitrate nitrogen content

培养时间/d	施肥处理(N)	土壤类型(S)	N × S
3	261.02 **	67.66 **	2.45 *
7	285.46 **	71.78 **	10.47 **
14	584.49 **	89.89 **	3.83 **
28	474.14 **	66.44 **	3.60 **
42	505.01 **	73.32 **	4.60 **
56	364.34 **	51.99 **	3.00 *
70	827.83 **	132.60 **	7.87 **
84	353.74 **	51.38 **	2.76 *

注: \* 表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.3 土壤累积矿化氮量和氮矿化速率

土壤累积矿化氮量表示一定时间内有机氮矿化量与微生物固氮量的差值,是土壤氮素供应的容量指标,一般用培养前后土壤矿质氮含量的差值表示,可以很好地反映土壤的供氮能力<sup>[30]</sup>。不同施肥处理下不同土壤类型累积矿化氮量的动态变化如图4所示。随着培养时间的延长,不同处理土壤氮素矿化过程基本相同,呈现先迅速增大后逐渐稳定的趋势。土壤矿化氮量在培养前7 d迅速累积,此后由于微生物的固持作用和土壤铵态氮转化损失,累积矿化氮量存在一定程度的下降,尤其是单施尿素处理。在培养中后期阶段,土壤矿质氮累积主要以硝态氮为主。培养试验结束后,不同土壤类型累积矿化氮量存在显著差异( $P < 0.05$ ),其中壤土累积矿化氮量最大,灰棕漠土累积矿化氮量最小。与CK处理相比,施肥处理显著提高了西北地区不同土壤类型累积矿化氮量,不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。单施尿素处理土壤累积矿化氮量最高,其次为尿素配施有机肥和单施有机肥处理。双因素方差分析结果表明(表4),施肥处理和土壤类型均对84 d室内好气培养期间土壤累积矿化氮量产生极显著影响,两者之间的交互作用也显著或极显著影响矿化过程中土壤累积矿化氮量。从F值来看,施肥和土壤类型均是影响氮素矿化过程的主要因素,施肥和土壤类型之间的交互作用是影响土壤累积矿化氮量的次要原因。

不同施肥处理下不同土壤类型氮矿化速率如

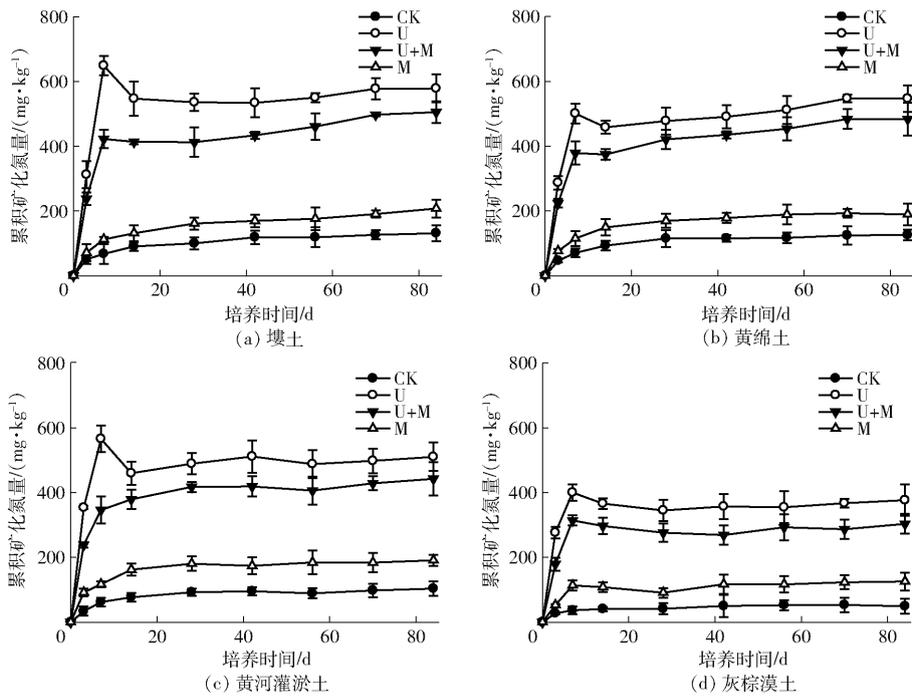


图4 不同处理土壤累积矿化氮量动态变化曲线

Fig. 4 Dynamic change curves of soil accumulative mineralized nitrogen content under different treatments

表4 土壤累积矿化氮量双因素方差分析

Tab. 4 Two-way analysis of variance on soil accumulative mineralized nitrogen content

培养时间/d	施肥处理(N)	土壤类型(S)	N × S
3	630.76**	15.07**	2.78*
7	867.87**	28.44**	10.70**
14	694.91**	32.97**	4.83**
28	533.59**	49.59**	3.21**
42	463.79**	42.14**	3.33**
56	346.38**	32.31**	2.42*
70	799.76**	88.96**	6.99**
84	362.55**	38.64**	2.29*

图5(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ))所示。总体而言,不同土壤氮矿化速率变化由大到小依次为壤土、黄绵土、黄河灌淤土、灰棕漠土,这主要与培养过程中土壤累积矿化氮量有关。在相同土壤类型下,与CK处理相比,各施肥处理均显著提高土壤氮矿化速率,处理间差异显著( $P < 0.05$ ),CK处理土壤氮矿化速率最小。单施尿素(U)处理对土壤氮矿化速率的提升效果最为显著,其次是尿素配施有机肥(U+M)处理,矿化速率分别为CK处理的4.34~7.70倍和3.83~6.21倍。

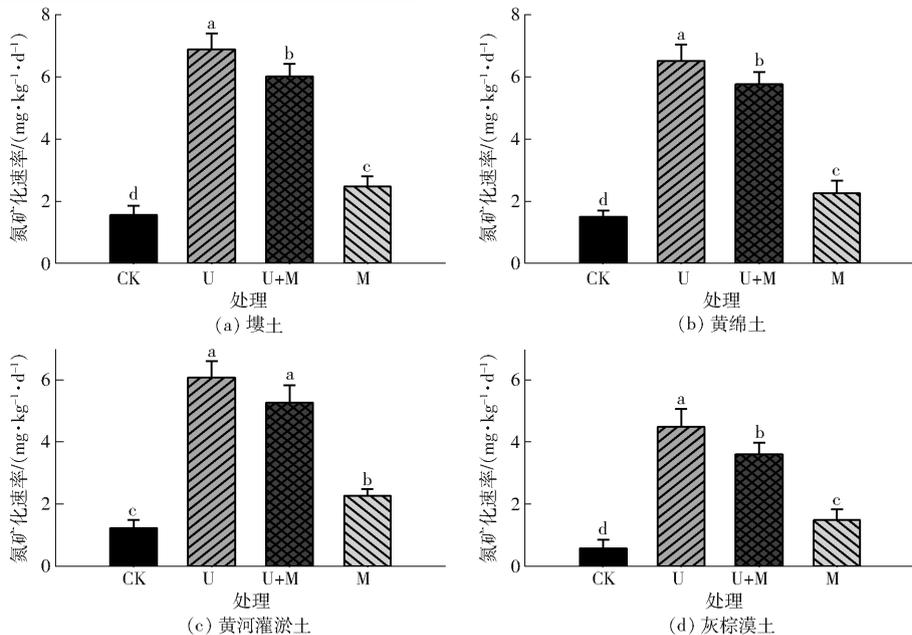


图5 不同处理土壤氮矿化速率

Fig. 5 Soil nitrogen mineralization rates under different treatments

## 2.4 土壤氮素矿化动力学特征

由表5可知,一级动力学方程  $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$  能较好地拟合土壤累积矿化氮量曲线(决定系数  $R^2$  不小于0.92)。氮矿化势  $N_0$  和矿化速率常数  $k$  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<sup>[31]</sup>。总体而言,在不同土壤类型中,土壤氮矿化势由大到小依次为壤土、黄绵土、黄河灌淤土、灰棕漠土,与土壤累积矿化氮量的大小顺序相同。而在矿化速率常数  $k$  中表现出相反

的关系,灰棕漠土  $k$  最大,表明该土壤的供氮强度最大,土壤有机氮将很快消耗殆尽。黄绵土和壤土  $k$  最小,表明土壤供氮的过程缓慢且持久。与CK处理相比,各施肥处理均显著提高土壤矿化势  $N_0$ ,其中U处理提升效果最为显著,其次为U+M和M处理,分别较对照处理增加331.65%~660.16%、278.73%~505.19%和51.25%~138.59%。施肥处理对矿化速率常数  $k$  也有显著影响。U处理矿化速率常数  $k$  最大,变化范围为0.312~0.518,显

表5 不同处理土壤氮素矿化一级动力学方程拟合结果

Tab.5 Fitting results of the first-order kinetic equation for describing soil nitrogen mineralization under different treatments

处理	壤土			黄绵土			黄河灌淤土			灰棕漠土		
	$N_0/$ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$k$	$R^2$									
CK	120.4 <sup>d</sup>	0.116 <sup>c</sup>	0.98 <sup>**</sup>	118.5 <sup>d</sup>	0.120 <sup>c</sup>	0.98 <sup>**</sup>	95.6 <sup>d</sup>	0.137 <sup>d</sup>	0.98 <sup>**</sup>	48.2 <sup>d</sup>	0.219 <sup>d</sup>	0.96 <sup>**</sup>
U	566.5 <sup>a</sup>	0.368 <sup>a</sup>	0.93 <sup>**</sup>	511.5 <sup>a</sup>	0.312 <sup>a</sup>	0.96 <sup>**</sup>	502.4 <sup>a</sup>	0.474 <sup>a</sup>	0.96 <sup>**</sup>	366.4 <sup>a</sup>	0.518 <sup>a</sup>	0.98 <sup>**</sup>
U+M	458.8 <sup>b</sup>	0.270 <sup>b</sup>	0.96 <sup>**</sup>	448.8 <sup>b</sup>	0.228 <sup>b</sup>	0.96 <sup>**</sup>	417.6 <sup>b</sup>	0.262 <sup>b</sup>	0.99 <sup>**</sup>	291.7 <sup>b</sup>	0.387 <sup>b</sup>	0.96 <sup>**</sup>
M	182.1 <sup>c</sup>	0.120 <sup>c</sup>	0.98 <sup>**</sup>	184.2 <sup>c</sup>	0.141 <sup>c</sup>	0.98 <sup>**</sup>	171.8 <sup>c</sup>	0.176 <sup>c</sup>	0.98 <sup>**</sup>	115.0 <sup>c</sup>	0.269 <sup>c</sup>	0.92 <sup>**</sup>

注:同列数据中不同小写字母表示同一土壤类型不同施肥处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

著高于其他3个处理,CK处理  $k$  最小。

## 2.5 相关性分析

分析土壤累积矿化氮量和矿化率与土壤理化性质的相关性关系(表6),结果表明,在室内恒温好气培养条件下,土壤累积矿化氮量与土壤有机质含量、

全氮含量、速效氮含量和pH值呈显著正相关关系,相关系数分别为0.938、0.929、0.995和0.998,与速效磷含量和粘粒含量未存在显著的相关关系。土壤氮素矿化率与土壤理化性质的相关性并未达到显著性水平,这可能与不同土壤的含氮量差异有关。

表6 土壤累积矿化氮量、矿化率与土壤理化性质的相关系数

Tab.6 Correlation coefficient between soil cumulative mineralized nitrogen, mineralization ratio and soil physical and chemical properties

氮素矿化指标	有机质含量	全氮含量	速效氮含量	速效磷含量	粘粒含量	pH值
累积矿化氮量	0.938 <sup>*</sup>	0.929 <sup>*</sup>	0.995 <sup>**</sup>	0.858	0.570	0.998 <sup>**</sup>
矿化率	-0.419	-0.457	-0.202	-0.567	0.047	-0.061

## 3 讨论

### 3.1 土壤类型对土壤氮素矿化的影响

研究表明,土壤类型对土壤氮素矿化量和矿化动力学特征参数有显著或极显著影响<sup>[22,32-33]</sup>。不同土壤类型可以通过显著改变微生物群落结构、活动和土壤粘粒对有机质的结合程度,进而影响土壤氮素矿化过程。本研究中,土壤类型显著影响土壤累积矿化氮量、氮矿化速率和矿化动力学特征参数。在不同土壤中,土壤累积矿化氮量由大到小依次为壤土、黄绵土、黄河灌淤土、灰棕漠土。由于灰棕漠土采集于青海省柴达木盆地,位于海拔较高的青藏高原地带,气候寒冷干燥,太阳辐射强,水土流失严重,土壤可供分解的碳、氮含量少<sup>[34]</sup>,土壤肥力低,微生物和酶活性较弱,因此抑制了土壤有机氮的矿

化。薛玉晨等<sup>[16]</sup>在有机质含量低、微生物活性弱的石灰性褐土也得出类似结论。壤土和黄绵土有机质含量较高,土壤水分、养分的保持能力强,微生物数量和活性较高,因此促进了土壤氮素矿化作用<sup>[5]</sup>,最终提高了土壤累积矿化氮量和矿化速率。

有研究认为,土壤有机质含量和全氮含量显著影响土壤氮素矿化量,其他养分也会一定程度上影响土壤氮素矿化量和矿化率<sup>[35]</sup>,这主要与试验方法、土壤类型和培养条件等有关。本研究发现,土壤累积矿化氮量与土壤有机质含量、全氮含量和速效氮含量呈显著正相关关系,与速效磷含量和粘粒含量的相关性不显著(表6),这与李紫燕等<sup>[25]</sup>和严德翼等<sup>[36]</sup>在我国黄土高原不同典型土壤氮素矿化过程的研究结果一致。王帘里等<sup>[22]</sup>在我国东部主要旱地土壤氮素矿化研究中发现,在不同培养温度梯

度下,土壤累积矿化氮量与土壤有机质和全氮含量表现出显著正相关关系。王士超等<sup>[37]</sup>通过西北地区温室土壤的研究表明,土壤有机质和全氮是决定氮素矿化的重要因素,与土壤氮素矿化量呈显著正相关,邵兴芳等<sup>[38]</sup>在黑土氮素矿化培养试验中也得出相同的结论。在本试验中,土壤 pH 值与土壤累积矿化氮量的相关关系达到极显著性水平。土壤 pH 值越高,土壤可溶性有机质含量越高,加快了土壤硝化作用,从而促进土壤有机氮矿化,但是 pH 值过高反而会抑制土壤微生物活性,从而减缓土壤氮素矿化作用<sup>[33]</sup>。土壤累积矿化氮量与粘粒含量的相关性不显著,这一结果与李紫燕等<sup>[25]</sup>在黄土高原土壤有机氮矿化过程的研究结果相同,与陆琳等<sup>[39]</sup>在植烟土壤氮素矿化的研究结果相反,这可能与试验过程中环境因子、土壤理化性质、有机肥类型和研究方法等因素有关。土壤氮素矿化率与所有土壤理化指标的相关性不显著,这与金雪霞等<sup>[40]</sup>研究结果一致,这主要由于不同土壤的含氮量差异较大。

### 3.2 有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响

土壤氮素矿化作用是土壤异养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。在农田生态系统中,不同培肥模式可以显著改变土壤理化性质和微生物环境,进而影响土壤累积矿化氮量和氮矿化速率<sup>[41]</sup>。在试验培养前期,土壤矿质氮和氮素矿化量迅速增加,随着培养时间的延长,氮矿化速率逐渐下降,累积矿化氮量基本保持不变。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,微生物活性较高,因此加快了氮矿化速率。然而在培养后期,易分解有机氮库和能源物质逐渐耗尽,碳源成为制约微生物活性的主要因素,因此矿化反应速度逐渐减缓,累积矿化氮量最终基本保持稳定<sup>[42]</sup>。

本研究表明,与不施肥处理相比,不同施肥处理显著提高土壤矿质氮含量、累积矿化氮量和氮矿化速率,其中单施尿素和尿素与有机肥配施处理对氮素矿化作用的促进效果较为明显,在一级动力学方程拟合参数( $N_0$ 、 $k$ )中也得出相似的结论。这是因为本研究中尿素的肥效发挥快,容易被土壤微生物矿化分解<sup>[43]</sup>,大量的活性氮素快速水解为铵态氮,显著增加了土壤氮素矿化速率和累积矿化量。而且尿素能够促进异养微生物大量繁殖<sup>[4]</sup>,提供充足的无机氮素,提高了氮矿化速率。本研究中,单施有机肥处理的土壤矿质氮量和累积矿化氮量也显著高于 CK 处理。张名豪等<sup>[32]</sup>研究发现,有机肥可以显著提高两种紫色土壤氮素矿化量,这主要与有机肥自

身的理化特性有关。娄燕宏等<sup>[30]</sup>研究表明,在褐土中添加有机物料可以显著提高土壤氮矿化速率,与本文的研究结果一致。原因可能是,有机肥的营养元素种类丰富,能够为微生物提供充足的碳源,提高可溶性有机氮含量,因此促进微生物活性的提高和快速繁殖,增强土壤有机氮矿化能力<sup>[13, 44]</sup>。并且有机肥料本身的氮素也能够被微生物矿化分解,从而提高土壤累积矿化氮量<sup>[20]</sup>。

在土壤中施加有机肥时,会显著改变土壤碳氮循环过程,产生一系列复杂的生化反应,影响土壤有机氮矿化作用和微生物固氮能力的动态变化<sup>[45]</sup>。有机肥的碳氮比可以有效地调控有机氮矿化的方向,是衡量氮素矿化能力的重要指标之一<sup>[46]</sup>。相关研究表明,当有机肥碳氮比大于 30 时,易分解的能源物质(碳源)较多,无机氮生物固持作用大于有机氮矿化作用,氮素表现为净固定;当碳氮比小于 20 时,两者强度变化相反,氮素表现为净矿化<sup>[47]</sup>。本研究中有有机肥碳氮比较低(6.88),氮素矿化作用大于微生物固持能力,因此有机氮在培养过程中主要发生净矿化。薛玉晨等<sup>[16]</sup>研究发现,碳氮比小(10.9)的鸡粪处理更容易激发土壤微生物活性,较其他有机肥(猪粪、牛粪)处理显著提高土壤硝态氮含量、硝态氮转化量和累积矿化氮量,与本试验研究结果一致。

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,因此显著提高了土壤累积矿化氮量和氮矿化势  $N_0$ 。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,增加土壤供氮潜力<sup>[18]</sup>。等氮条件下,尿素与有机肥配施可以增加粘土矿物对有机氮素的固定<sup>[48]</sup>,此部分“新固定铵”可以在后期重新释放供作物吸收利用,增强了有机氮素的有效性<sup>[23]</sup>。本研究表明,单施尿素处理的土壤矿质氮含量最高,但是过高的矿质氮含量会影响土壤氮素矿化和固持机制,反而会抑制土壤有机氮矿化作用<sup>[4]</sup>。土壤有机氮矿化过程通常伴随着  $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等气体的损失。过量的矿质氮在土壤无法长时间留存,如果在短期内无法被微生物同化或作物吸收利用,将会随着水分向土壤深处转移淋溶,造成地下水硝酸盐污染等问题,并且在氮素运转循环过程中促进  $\text{N}_2\text{O}$  气体排放<sup>[43, 49-50]</sup>。由于试验选用的土壤 pH 值较高,在碱性环境中将会导致铵态氮以  $\text{NH}_3$  形式挥发<sup>[51]</sup>,造成土壤氮素损失,尤其是单施尿素处理。有机无机肥配施处理的土壤铵态氮含量相对较低,且有机质在分解过程中释放大量有机酸,同时形成腐殖质,抑制尿素水解过程中

土壤酸碱度的升高,进而显著降低土壤氮挥发损失<sup>[52]</sup>。周慧等<sup>[53]</sup>的研究表明,在等氮施肥的基础上,不同有机无机肥配施处理较单独施用化肥能够显著减少土壤  $N_2O$  累积排放量和排放系数。这可能是因为尿素的氮素释放速率快,有机无机肥配施处理土壤速效氮含量低于单施尿素处理,参与硝化和反硝化过程的底物减少,同时配施有机肥可以改善土壤理化性质,提高微生物固持能力,导致土壤  $N_2O$  排放量减少<sup>[54-55]</sup>。

本研究表明,在土壤氮素矿化培养试验中,施肥和土壤类型均对土壤铵态氮含量、硝态氮含量和累积矿化氮量产生极显著影响,并且两者之间存在显著的交互作用( $P < 0.05$ )。有机无机肥配施处理显著提高了我国西北地区不同土壤类型矿质氮含量和累积矿化氮量,促进土壤氮素矿化过程,提高氮矿化速率,显著增加土壤供氮容量和潜力。在等氮条件下有机无机肥配施,不仅可以提高土壤有机质含量及微生物数量和活性,改善有机氮品质,提高活性有机氮库,降低无机氮损失的风险,而且配施的尿素可以保证土壤氮素供应充足,防止出现作物和微生物之间的争氮现象,保障作物高产稳产。综合考虑土壤氮素、氮肥利用率和生态效益等,有机无机肥配施可推荐为当地提高土壤肥力、实现农业绿色可持续发展的施肥模式。由于本研究是室内培养试验,与田间实际环境条件有很大差异,因此,关于有机无机肥配施对西北地区不同土壤类型氮素矿化特征影响

规律的研究还需开展田间原位试验以进行深入的探索。

## 4 结论

(1)在室内好气培养条件下,不同类型土壤氮素矿化特征总体一致。试验前期土壤氮素矿化速率较快,土壤矿质氮含量和累积矿化氮量迅速增加。随着培养时间的增加,土壤矿化速率逐渐降低,累积矿化氮量基本保持不变。

(2)双因素方差分析表明,施肥和土壤类型均显著影响培养期间土壤氮素矿化过程。不同施肥处理显著提高不同土壤类型矿质氮含量、累积矿化氮量和矿化特征参数( $N_0, k$ ),尤其是单施尿素和有机无机肥配施处理,处理间差异显著。土壤类型也显著影响土壤硝态氮含量和累积矿化氮量,且与施肥两者间有明显交互作用。

(3)采用一级动力学方程拟合土壤累积矿化氮量,拟合效果良好( $R^2$ 不小于0.92)。相关分析表明,土壤累积矿化氮量与土壤有机质含量、全氮含量、速效氮含量和 pH 值呈显著正相关关系。矿化率与土壤性质的相关性未达到显著性水平。

(4)综上所述,在等氮条件下有机无机肥的合理配施能够显著增加我国西北部地区典型旱地土壤矿质氮含量、累积矿化氮量和矿化速率,提升土壤矿化供氮能力,优化氮素矿化特征参数,减少土壤氮素损失,从而提高土壤肥力和氮素利用效率。

## 参 考 文 献

- [1] 吕真真,吴向东,刘益仁,等. 长期不同比例有机肥-化肥配施下红壤性水稻土氮素矿化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 47-53.  
LÜ Zhenzhen, WU Xiangdong, LIU Yiren, et al. Nitrogen mineralization characteristics of red paddy soil under long-term different proportions of organic and inorganic fertilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(4): 47-53. (in Chinese)
- [2] 李彦,李廷亮,焦欢,等. 不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 227-232, 239.  
LI Yan, LI Tingliang, JIAO Huan, et al. Effects of different fertilization measures on nitrogen mineralization in reclaimed soil of coal mining subsidence area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 227-232, 239. (in Chinese)
- [3] GUNTHINAS M E, LEIROS M C, TRASAR-CEPEDA C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 48: 73-80.
- [4] 李平,郎漫,李煜姗,等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1326-1332.  
LI Ping, LANG Man, LI Yushan, et al. Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(7): 1326-1332. (in Chinese)
- [5] HARRISON-KIRK T, BEARE M H, MEENKEN E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 74: 50-60.
- [6] 彭银燕,黄运湘,孙梅. 长期施肥条件下水稻土有机氮组分及矿化特性研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 173-176, 181.  
PENG Yinyan, HUANG Yunxiang, SUN Mei. Fractions of organic and N mineralization characteristic under long term fertilization on paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 173-176, 181. (in Chinese)

- [7] 唐海明, 石丽红, 文丽, 等. 长期施肥对双季稻田根际土壤氮素的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(3): 492–499.  
TANG Haiming, SHI Lihong, WEN Li, et al. Effects of different long-term fertilizer managements on rhizosphere soil nitrogen in the double-cropping rice field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(3): 492–499. (in Chinese)
- [8] 李佳蓓, 张富仓, 段晨骁, 等. 氮肥溶液磁化灌溉下土壤入渗特征和水氮迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 316–324.  
LI Jiabei, ZHANG Fucang, DUAN Chenxiao, et al. Characteristics of soil infiltration and water and nitrogen transport under irrigation with magnetized nitrogen fertilizer solution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 316–324. (in Chinese)
- [9] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.  
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259–273. (in Chinese)
- [10] 邵兴芳, 申小冉, 张建峰, 等. 外源氮在中、低肥力红壤中的转化与去向研究[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 6–11.  
SHAO Xingfang, SHEN Xiaoran, ZHANG Jianfeng, et al. Exogenous nitrogen transformation and fate characteristics under different fertility red soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(2): 6–11. (in Chinese)
- [11] 赵颖, 周桦, 马强, 等. 施肥和耕作方式对棕壤微生物生物量碳氮的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1099–1103.  
ZHAO Ying, ZHOU Ye, MA Qiang, et al. Soil microbial biomass C and N as affected by fertilization and cultivation systems [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1099–1103. (in Chinese)
- [12] KHALIQ A, KALEEM A M. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic-inorganic amendments in the Himalayan region of Kashmir, Pakistan[J]. CATENA, 2015, 126: 209–219.
- [13] 石博文, 赖欣, 李洁, 等. 尿素与有机肥配施对棕红壤氮素转化的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 938–945.  
SHI Bowen, LAI Xin, LI Jie, et al. Effect of interaction between manure and urea on transformation of nitrogen in brown red soil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(5): 938–945. (in Chinese)
- [14] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 盐分与有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 295–304.  
ZHOU Hui, SHI Haibin, GUO Jiawei, et al. Effect of salt and organic-inorganic fertilizer application on soil nitrogen mineralization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 295–304. (in Chinese)
- [15] 张云舒, 刘骅, 王西和, 等. 灰漠土长期试验地氮素矿化和硝化作用的特征[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(4): 700–703.  
ZHANG Yunshu, LIU Hua, WANG Xihe, et al. The characteristics of mineralization and nitrification in grey desert soil from long term fertilization experiments[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(4): 700–703. (in Chinese)
- [16] 薛玉晨, 郝鲜俊, 韩阳, 等. 不同有机肥对矿区复垦土壤氮素矿化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(2): 378–385.  
XUE Yuchen, HAO Xianjun, HAN Yang, et al. Effects of different organic fertilizers on the mineralization of nitrogen in a mine reclaimed soil[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(2): 378–385. (in Chinese)
- [17] WATTS D B, TORBERT H A, PRIOR S A, et al. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1239–1247.
- [18] 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 Lu, WEN Shilin, CAI Zejiang, 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. (in Chinese)
- [19] 张旭, 席北斗, 赵越, 等. 有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2448–2455.  
ZHANG Xu, XI Beidou, ZHAO Yue, et al. Characteristics of organic nitrogen mineralization in organic waste compost-amended soil[J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2448–2455. (in Chinese)
- [20] 张若扬, 郝鲜俊, 韩阳, 等. 不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化动态特征研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 188–194.  
ZHANG Ruoyang, HAO Xianjun, HAN Yang, et al. Dynamic characteristics of soil nitrogen mineralization in mining subsidence area with different organic fertilizers[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 188–194. (in Chinese)
- [21] 王树会, 刘青丽. 云南主要植烟土壤不同土层氮矿化研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 14–19.  
WANG Shuhui, LIU Qingli. Nitrogen mineralization in Yunnan tobacco major growing soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(1): 14–19. (in Chinese)
- [22] 王帘里, 孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 583–591.  
WANG Lianli, SUN Bo. Effects of temperature and soil type on nitrogen mineralization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(3): 583–591. (in Chinese)
- [23] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 749–757.  
LI Lingling, LI Shutian. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(3): 749–757. (in Chinese)

- [24] 张丽,张磊,鲁剑巍,等. 添加尿素和秸秆对三熟制水旱轮作土壤各形态氮素的影响[J]. 土壤,2017,49(1):13-18.  
ZHANG Li, ZHANG Lei, LU Jianwei, et al. Effects of urea and straw on soil different nitrogen forms under paddy-upland rotation of triple cropping system[J]. Soils, 2017, 49(1): 13-18. (in Chinese)
- [25] 李紫燕,李世清,李生秀. 黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J]. 生态学报,2008,28(10):4940-4950.  
LI Ziyang, LI Shiqing, LI Shengxiu. Organic N mineralization in typical soils of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4940-4950. (in Chinese)
- [26] 史海滨. 盐渍化土壤水热盐迁移与节水灌溉理论研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [27] ZENG W Z, XU C, WU J W, et al. Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics[J]. Ecological Chemistry and Engineering, 2013, 20(3): 519-530.
- [28] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.  
LI Yanqing. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [30] 娄燕宏,诸葛玉平,魏猛,等. 外源有机物料对土壤氮矿化的影响[J]. 土壤通报,2009,40(2):315-320.  
LOU Yanhong, ZHUGE Yuping, WEI Meng, et al. Effect of extraneous organic materials on the mineralization of nitrogen in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 315-320. (in Chinese)
- [31] 秦子娴,张宇亭,周志峰,等. 长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3392-3400.  
QIN Zixian, ZHANG Yuting, ZHOU Zhifeng, et al. Characteristics of mineralization and nitrification in neutral purple paddy soil from a long-term fertilization experiment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3392-3400. (in Chinese)
- [32] 张名豪,卢吉文,赵秀兰. 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响[J]. 环境科学,2016,37(6):2291-2297.  
ZHANG Minghao, LU Jiwen, ZHAO Xiulan. Effect of different organic materials on nitrogen mineralization in two purple soils [J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2291-2297. (in Chinese)
- [33] 田冬,高明,徐畅. 土壤水分和氮添加对3种质地紫色土氮矿化及土壤pH的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):255-261.  
TIAN Dong, GAO Ming, XU Chang. Effects of soil moisture and nitrogen addition on nitrogen mineralization and soil pH of purple soil of three different textures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 255-261. (in Chinese)
- [34] DUAN C, CHEN J, LI J, et al. Biomaterial amendments combined with ridge-furrow mulching improve soil hydrothermal characteristics and wolfberry (*Lycium barbarum* L.) growth in the Qaidam Basin of China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107213.
- [35] RAIESI F. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(1): 13-20.
- [36] 严德翼,周建斌,邱桃玉,等. 黄土区不同土壤类型及土地利用方式对土壤氮素矿化作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(10):103-109.  
YAN Deyi, ZHOU Jianbin, QIU Taoyu, et al. Effects of the different soil types and landuse on nitrogen mineralization on the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.), 2007, 35(10): 103-109. (in Chinese)
- [37] 王士超,周建斌,陈竹君,等. 温度对不同年限日光温室土壤氮素矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):121-127.  
WANG Shichao, ZHOU Jianbin, CHEN Zhujun, et al. Effects of temperature on soil nitrogen mineralization in solar greenhouses with different cultivation years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 121-127. (in Chinese)
- [38] 邵兴芳,徐明岗,张文菊,等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):326-335.  
SHAO Xingfang, XU Minggang, ZHANG Wenju, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 326-335. (in Chinese)
- [39] 陆琳,米艳华,王树会,等. 不同质地植烟土壤氮素矿化的差异性[J]. 中国农学通报,2011,27(3):147-153.  
LU Lin, MI Yanhua, WANG Shuhui, et al. Effect of soil character on nitrogen mineralization of tobacco soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 147-153. (in Chinese)
- [40] 金雪霞,范晓晖,蔡贵信,等. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征[J]. 土壤,2004,36(4):382-386.  
JIN Xuexia, FAN Xiaohui, CAI Guixin, et al. Characteristics of soil nitrogen mineralization and nitrification in vegetable garden soils[J]. Soils, 2004, 36(4): 382-386. (in Chinese)
- [41] 李文军,杨奇勇,杨基峰,等. 长期施肥下洞庭湖水稻土氮素矿化及其温度敏感性研究[J]. 农业机械学报,2017,48(11):261-270.  
LI Wenjun, YANG Qiyong, YANG Jifeng, et al. Nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity in paddy soils in Dongting Lake region of China under long-term fertilization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural

- Machinery, 2017, 48(11): 261–270. (in Chinese)
- [42] 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 Yinkun, CHEN Minpeng, MEI Xurong, 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. (in Chinese)
- [43] 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, 39(10): 4717–4726.  
TIAN Feifei, JI Hongfei, WANG Leyun, et al. Effects of various combinations of fertilizer, soil moisture, and temperature on nitrogen mineralization and soluble organic nitrogen in agricultural soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4717–4726. (in Chinese)
- [44] FOSTER E J, HANSEN N, WALLENSTEIN M, et al. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 233: 404–414.
- [45] SAID-PULLICINO D, CUCU M A, SODANO M, et al. Nitrogen immobilization in paddy soils as affected by redox conditions and rice straw incorporation[J]. Geoderma, 2014, 228–229: 44–53.
- [46] CORDOVIL C M D S, CABRAL F, COUTINHO J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3265–3268.
- [47] 石洪艾, 尤孟阳, 李禄军, 等. 长期施用有机物料下黑土氮素有效性及其与作物产量的关系[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2283–2288.  
SHI Hongai, YOU Mengyang, LI Lujun, et al. Nitrogen availability in black soils and its relations with crop yields under long-term applications of organic amendments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(9): 2283–2288. (in Chinese)
- [48] 王岩, 张莹, 沈其荣, 等. 施用有机、无机肥后土壤微生物量、固定态铵的变化及其有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 307–314.  
WANG Yan, ZHANG Ying, SHEN Qirong, et al. The changes of soil microbial biomass and the clay fixed ammonium after application of organic and inorganic fertilizers and their bio-effects[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1997, 3(4): 307–314. (in Chinese)
- [49] 胡国平, 曹靖, 杨海兴, 等. 无机氮与蔬菜废弃物耦合对土壤氮矿化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 739–745.  
HU Guoping, CAO Jing, YANG Haixing, et al. Coupling effect of inorganic nitrogen and cabbage waste on soil nitrogen mineralization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 739–745. (in Chinese)
- [50] MENG L, DING W, CAI Z. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2037–2045.
- [51] MORENO C J, ZORNOZA R, FAZ A. Carbon and nitrogen mineralization during decomposition of crop residues in a calcareous soil[J]. Geoderma, 2014, 230–231: 58–63.
- [52] DONG W X, HU C S, ZHANG Y M, et al. Ammonia volatilization from urea incorporation with wheat and maize straw on a loamy soil in China[C]//The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI, 2009.
- [53] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3811–3821.  
ZHOU Hui, SHI Haibin, GUO Jiawei, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on N<sub>2</sub>O emissions from saline soil[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3811–3821. (in Chinese)
- [54] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 145–153.  
BU Rongyan, LI Min, HAN Shang, et al. Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 145–153. (in Chinese)
- [55] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1575–1578.  
ZHANG Yali, ZHANG Juan, SHEN Qirong, et al. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1575–1578. (in Chinese)