

## 苏打盐碱化稻田土壤反硝化和氨挥发特征及主要影响因子

黄立华, 杨易, 刘伯顺, 杨靖民, 王平, 黄广志, 蒋小瞳

### 引用本文:

黄立华, 杨易, 刘伯顺, 杨靖民, 王平, 黄广志, 蒋小瞳. 苏打盐碱化稻田土壤反硝化和氨挥发特征及主要影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1748-1757.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0239>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 不同盐碱化土壤对 $\text{NH}_4^+$ 吸附特性研究

徐祎璠, 孙方园, 郭亚馨, 马秀兰, 王玉军

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2345-2353 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0445>

#### 玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化

段宏美, 窦森, 王德辉, 郑爽, 李双翼, 张一枫, 白月

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2159-2166 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0315>

#### 稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响

李明, 马飞, 肖国举

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 495-504 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1107>

#### 模拟降雨条件下赤泥对土壤盐碱化的影响

刘继东, 杜平, 任杰, 陈娟, 刘小莲, 徐刚, 吴明红

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1836-1843 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0242>

#### 氢氧化镁铝改良滨海盐碱土机理与效果研究

田露, 赵林, 杨永奎, 乔治

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2220-2225 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1738>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄立华, 杨易, 刘伯顺, 等. 苏打盐碱化稻田土壤反硝化和氨挥发特征及主要影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1748-1757.

HUANG L H, YANG Y, LIU B S, et al. Characteristics and main influencing factors of denitrification and ammonia volatilization in saline-sodic paddy soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1748-1757.

# 苏打盐碱化稻田土壤反硝化和氨挥发特征及主要影响因子

黄立华<sup>1,2</sup>, 杨易<sup>1,3</sup>, 刘伯顺<sup>1,2</sup>, 杨靖民<sup>3</sup>, 王平<sup>4</sup>, 黄广志<sup>1,2</sup>, 蒋小瞳<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 吉林大安农田生态系统国家野外科学观测研究站, 吉林 大安 131317; 3. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 4. 内蒙古自治区扎赉特旗现代农业产业园管理中心, 内蒙古 扎赉特旗 137600)

**摘要:**为阐明土壤盐碱化程度对氮素气态损失的影响,本研究通过随机采集30个不同盐碱化程度的稻田土壤(0~20 cm)样品,根据盐碱化程度将其划分为轻度(含盐量0.1%~0.3%,碱化度5%~15%)、中度(含盐量0.3%~0.5%,碱化度15%~30%)和重度(含盐量0.5%~0.7%,碱化度30%~45%)盐碱土3类,每个类别中依据最小归类样品数选取盐碱化程度接近的3个土样作为3次重复,进行实验室模拟培养分析,探究不同盐碱化土壤氮素反硝化和氨挥发动态变化特征及其主要影响因素。结果表明,随着土壤盐碱化程度的增加,氮素的反硝化作用显著降低,氨挥发作用显著增加,硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和脲酶活性显著降低( $P<0.05$ )。与轻度盐碱土相比,中度和重度盐碱土相同培养时间的氮素反硝化速率分别降低了18.9%和37.8%,累积反硝化氮量分别降低了13.7%和29.4%,氨挥发速率分别增加了30.8%和64.8%,累积氨挥发量分别增加了36.6%和59.4%。逐步回归分析表明,EC、ESP(碱化度)、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和TN是影响苏打盐碱地稻田土壤累积反硝化氮量的主要因素,EC、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和SOM(土壤有机质)是影响累积氨挥发量的主要因素。土壤盐碱化虽然抑制了氮素的反硝化作用,但是显著增强了氨挥发作用。

**关键词:**苏打盐碱土;氮素;反硝化;氨挥发;影响因素

中图分类号:S156.41 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)08-1748-10 doi:10.11654/jaes.2023-0239

## Characteristics and main influencing factors of denitrification and ammonia volatilization in saline-sodic paddy soils

HUANG Lihua<sup>1,2</sup>, YANG Yi<sup>1,3</sup>, LIU Baishun<sup>1,2</sup>, YANG Jingmin<sup>3</sup>, WANG Ping<sup>4</sup>, HUANG Guangzhi<sup>1,2</sup>, JIANG Xiaotong<sup>1,3</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. Jilin Da'an Farmland Ecosystem National Observation and Research Station, Da'an 131317, China; 3. College of Resources and Environmental, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 4. Management Center of Jalaid National Modern Agricultural Industrial Park in Inner Mongolia Autonomous Region, Jalaid 137600, China)

**Abstract:** Nitrogen loss caused by fertilization in farmland is an important source of environmental pollution. In order to clarify the effect of different degrees of soil salinization on nitrogen gas loss, 30 paddy soil samples with different degrees of salinization were randomly taken at 0-20 cm depth. According to the degree of salinization, the samples were divided into light (0.1% - 0.3% salt content, 5% - 15% exchangeable sodium percentage), moderate (0.3% - 0.5% salt content, 15% - 30% exchangeable sodium percentage), and severe (0.5% -

收稿日期:2023-03-30 录用日期:2023-05-09

作者简介:黄立华(1974—),男,博士,正高级工程师,研究方向为盐碱地生态治理与农业高效利用、土壤生态及植物逆境营养等。

E-mail: huanglihua@iga.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41977148);吉林省科技发展创新人才项目(20220508110RC);中国科学院黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28110103)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977148); The Science and Technology Development Foundation of Jilin Province, China(20220508110RC); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA28110103)

0.7% salt content, 30%–45% exchangeable sodium percentage) saline-sodic soils. In each category, three soil samples with a similar degree of salinization were selected, according to the minimum number of classified samples (three replicates) for laboratory simulation culture analysis, in order to explore the dynamic characteristics of nitrogen denitrification and ammonia volatilization as well as their main influencing factors in soils with different degrees of salinization. The results showed that nitrogen denitrification decreased significantly, ammonia volatilization increased significantly, and the activities of nitrate reductase, nitrite reductase, and urease decreased significantly with increasing soil salinization ( $P < 0.05$ ). The maximum denitrification rate and cumulative nitrogen denitrification in moderate and severe saline-sodic soil were 18.9% and 37.8%, 13.7% and 29.4% lower than those of light saline-sodic soil, respectively. The maximum ammonia volatilization rate and cumulative ammonia volatilization in moderate and severe saline-sodic soil were 30.8% and 64.8%, 36.6% and 59.4% higher than those of light saline-sodic soil, respectively. Stepwise regression analysis showed that EC, ESP (exchangeable sodium saturation percentage),  $\text{CO}_3^{2-}$ , and TN were the main factors affecting cumulative nitrogen denitrification, while EC,  $\text{CO}_3^{2-}$ , and SOM (soil organic matter) were the main factors affecting cumulative ammonia volatilization. Furthermore, higher  $\text{Na}^+$  and  $\text{CO}_3^{2-}$  content were the fundamental reasons for increased gaseous nitrogen loss in saline-sodic paddy fields. Although soil salinization inhibited nitrogen denitrification, it significantly enhanced ammonia volatilization, resulting in increased overall gaseous nitrogen loss and loss rate.

**Keywords:** saline-sodic soil; nitrogen; denitrification; ammonia volatilization; influencing factor

土壤盐碱化是当今世界面临的重要环境问题。盐碱土在我国分布广泛,不同类型的盐碱地是重要的和潜在的农业资源<sup>[1]</sup>。改良和利用盐碱地是贯彻国家“藏粮于地、藏粮于技”战略的重要举措。2021年10月习近平总书记在视察山东省东营市时强调了开发利用盐碱地对保障中国饭碗的重要作用。2022年1月中央印发的“一号文件”明确要求“积极挖掘潜力增加耕地,支持将符合条件的盐碱地等后备资源适度有序开发为耕地”。

由于作物需要从土壤中吸收大量的养分才能获得产量,盐碱地在农业利用过程中必将伴随着施肥等农艺措施。大量研究表明,苏打盐碱土不仅盐碱障碍严重,土壤基础肥力水平也较低,尤其土壤氮素资源非常匮乏<sup>[2]</sup>。施用氮肥是苏打盐碱地作物获得增产的重要措施<sup>[3]</sup>,但盐碱地区氮肥利用效率整体偏低<sup>[4]</sup>。随着土壤盐碱程度的增加,氮肥损失明显增加,损失途径包括反硝化、氨挥发、淋洗和径流等<sup>[5]</sup>,其中最主要的损失途径是反硝化和氨挥发<sup>[6-7]</sup>。在低盐碱条件下,盐度升高对反硝化速率限制作用较明显,但在高盐度条件下,反硝化速率降低并不显著<sup>[8]</sup>,反硝化速率与pH呈显著负相关<sup>[9]</sup>。盐碱的增加同时也促进了土壤中的氨挥发<sup>[10]</sup>,特别是在碱性土壤中,随着土壤pH和碱化度增加,施用氮肥产生的氨挥发量明显地增加<sup>[11]</sup>,并且氨挥发损失主要受控于土壤pH和碱化度的影响<sup>[12]</sup>。然而,不同研究者对于土壤盐碱影响反硝化和氨挥发的主控障碍因素的论述不尽相同<sup>[8-9,12]</sup>,有关盐碱土反硝化和氨挥发的过程机制也有待深入研究。

关于土壤盐碱对反硝化和氨挥发的影响近年来

已成为许多研究者关注的热点<sup>[13]</sup>,但就影响机制还存在诸多争议,有人认为盐碱土主要受到土壤化学性质的影响,其中高盐度和碱化度是主要影响因素<sup>[14]</sup>,也有人认为土壤盐碱主要抑制了微生物活性<sup>[15]</sup>,对反硝化和氨挥发起着间接作用。土壤酶作为其中最活跃的组分之一参与土壤中各种生物化学过程,其活性的强弱可直接反映土壤中物质转化状况和土壤肥力水平<sup>[16]</sup>。在土壤氮素转化中,硝酸还原酶<sup>[17]</sup>和亚硝酸还原酶<sup>[18]</sup>在反硝化过程中起着重要作用,而脲酶则通过影响尿素分解成为影响土壤氨挥发损失的重要驱动因素<sup>[19]</sup>。上述相关土壤酶在不同盐碱土中的活性变化是否对氮素反硝化和氨挥发起到决定性作用有待研究。

本研究针对苏打盐碱地稻田氮肥利用率低的现状和盐碱土分布存在空间异质性的特点,先随机采集土壤样品,通过对理化指标分析划分土壤盐碱化程度,然后采用室内模拟培养实验的方法分别研究不同盐碱化程度土壤氮素反硝化和氨挥发过程以及相关土壤酶的活性变化,并建立氮素反硝化和氨挥发通量与土壤指标的回归方程,分析不同土壤盐碱化参数、盐离子含量以及主要养分含量对土壤反硝化和氨挥发的影响,期望通过对氮素转化与盐碱关系的分析阐明影响反硝化和氨挥发作用的主要因子,为未来盐碱化农田氮素转化研究和氮肥利用效率提高提供更多的理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点概况

土壤样品采自吉林大安农田生态系统国家野外

科学观测研究站(45°35′58″~45°36′28″N, 123°50′27″~123°51′31″E)。该站位于吉林省大安市红岗子乡境内,属温带大陆性季风气候,具有春季干旱多风、夏季炎热、秋季少雨、冬季漫长寒冷等特点,年平均气温4.7℃,降雨量约400 mm左右,蒸发量1 700 mm以上,全年光照充足,无霜期在135 d左右,≥10℃的有效积温约2 900℃,适宜作物单季种植。土壤为典型苏打盐碱化草甸土。2003年建站后陆续将部分退化盐碱地开垦为稻田,田块设置为面积1 000 m<sup>2</sup>(40 m×25 m)的统一规格,采用嫩江引水灌溉,单灌单排,统一耕种管理。由于开垦前土壤盐碱化程度不同,虽经过短期种稻,不同田块间的土壤盐碱化程度仍存在较大差异。

## 1.2 土壤样品采集与盐碱化程度划分

土壤样品采集工作于4月下旬春季稻田耕翻泡田前进行,土层1 m以上完全解冻,0~20 cm土层无积水或泥泞现象。在站区内随机选择30块盐碱化程度不同的稻田,每块稻田用土钻随机采集5点0~20 cm土样,采样鲜土量约800~1 000 g,混合装入自封袋,贴上标签,带回实验室混合均匀后按四分法分为2份,1份放入4℃的冰箱内保存,用于培养实验,另1份自然风干,过20目和60目筛后测定土壤盐分离子含量、养分含量及部分盐碱化参数,其他盐碱化参数通过盐分离子含量计算获得。

根据30份土样测试的盐碱指标(主要为含盐量和碱化度),参照《吉林土壤》对苏打盐碱土的盐碱化程度划分标准<sup>[20]</sup>,将30份土样依次划分为轻度、中度和重度盐碱土<sup>[21]</sup>,每个类别中依据最小归类样品数选取盐碱化程度接近的3个土样作为重复,3种土壤的基本盐碱化程度列于表1,详细理化性质可参考文献<sup>[21]</sup>,共9个土壤样品进行氮素反硝化和氨挥发培养试验。

## 1.3 培养实验与测试指标

### 1.3.1 反硝化培养实验

反硝化培养实验主要参照张先富等<sup>[22]</sup>的方法,以3种不同盐碱化土壤(轻度、中度和重度)为处理,每

个处理选择3个代表性土样作为重复,每个重复再各称取6份土样进行培养,以便培养过程中定期进行破坏性取样,共计54份。每份培养土样称取40.0 g,装入100 mL(顶部直径64 mm,底部直径54 mm,高40 mm)塑料盒中,先加入一定量的水,使土壤全部湿润并驱出土中空气,再加水至土面水层0.5~1.0 cm,形成淹水培养条件,用无菌封口膜封口,置于25℃培养箱中恒温培养,每天称量补水,保证培养期间水量恒定。培养时间为21 d,于培养后的0、3、6、9、15、21 d分6次取样,测定土壤含水量、硝态氮含量、硝酸还原酶活性和亚硝酸还原酶活性。每个处理每次取3个重复,以3次测定结果的平均值为测定值,分别计算氮素反硝化速率和累积反硝化氮量,具体公式如下:

$$\text{氮素反硝化速率} = \frac{(\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0} - (\text{NO}_3^- - \text{N})_t}{t} \quad (1)$$

$$\text{累积反硝化氮量} = (\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0} - (\text{NO}_3^- - \text{N})_t \quad (2)$$

式中:氮素反硝化速率的单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;累积反硝化氮量的单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;t为培养时间,d; $(\text{NO}_3^- - \text{N})_{t_0}$ 为培养初期硝态氮含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , $(\text{NO}_3^- - \text{N})_t$ 为t时间硝态氮含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3.2 氨挥发培养实验

氨挥发量的测定采用“静态吸收法”,具体参照王欢等<sup>[23]</sup>的方法,同样以3种不同盐碱化土壤为处理,每处理3次重复,共计9份。每份培养土样称取130.0 g,装入500 mL(顶部直径116 mm,底部直径81 mm,高74 mm)塑料盒中,加入0.05 g尿素与土壤混匀(折合纯氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),加入一定量的水使土壤全部湿润并驱出土中空气,再加水保持土面水层0.5~1.0 cm,形成淹水培养条件。培养开始前在培养装置底部放入装有20 mL 2%的硼酸吸收液的小烧杯(内置指示剂3~5滴),用于吸收培养过程中挥发出的氨气,最后用无菌封口膜封口,置于25℃恒温培养箱中进行培养,同时开展不加土壤的空白实验,培养时

表1 供试土壤的基本盐碱化参数

Table 1 Basic salinization and alkalinization parameters of three kinds of soils

土壤类型 Soil type	pH <sub>(土:水=1:2.5)</sub>	电导率 <sub>(土:水=1:2.5)</sub> /( $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) Electronic conductivity (EC)	碱化度/% Exchangeable sodium percentage (ESP)	含盐量/% Soil salt content (SSC)
轻度盐碱土 Light saline-sodic soil	8.20±0.10c	0.26±0.05c	12.82±0.25c	0.24±0.01c
中度盐碱土 Moderate saline-sodic soil	8.88±0.10b	0.54±0.01b	24.50±1.02b	0.32±0.01b
重度盐碱土 Severe saline-sodic soil	9.22±0.06a	0.71±0.05a	50.29±1.14a	0.52±0.03a

注:表中数据为每个等级中三个土壤样品的平均值±标准差,不同小写字母表示三个等级之间土壤指标的差异显著性, $P<0.05$ 。

Note: The data in the table is the average ± standard deviation of the three soil samples in each grade, and different lowercase letters indicate the significance of the difference in soil indexes between the three grades,  $P<0.05$ .

间为21 d,分别于培养后的3、6、9、15、21 d取出小烧杯,更换新的硼酸吸收液,然后用 $0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸滴定测定氨吸收量。与此同时,分别从每个处理中取样测定土壤脲酶活性。每个处理每次取3个重复,以3次测定结果的平均值为测定值,分别计算累积氨挥发量和氨挥发速率,具体公式如下:

$$\text{累积氨挥发量} = \text{AVN}_3 + \text{AVN}_6 + \dots + \text{AVN}_{21} \quad (3)$$

$$\text{氨挥发速率} = \frac{\text{CAVN}}{t} \quad (4)$$

式中:累积氨挥发量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;氨挥发速率, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $t$ 为培养时间,d; $\text{AVN}_3\sim\text{AVN}_{21}$ 分别为第3天到第21天测得的氨挥发量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;CAVN为累积氨挥发量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3.3 测定指标及方法

土壤pH和电导率(EC)采用酸度计和电导率仪直接测定,土水比为1:2.5;土壤盐分离子 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ ,含盐量(SSC,% )、阳离子交换量(CEC)、交换性钠离子( $\text{Na}_{\text{ex}}^+$ )、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(SOM)、全氮(TN)和含水量等常规指标均采用土壤农化分析手册的方法测定<sup>[24]</sup>。土壤碱化度(ESP,% )按 $[\text{Na}_{\text{ex}}^+]/\text{CEC}\times 100$ 计算;土壤中硝态氮含量测定,分别称取土样12.00 g,加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl溶液100 mL进行浸提,过滤后采用连续流动注射分析仪(Seal AA3,德国)测定;土壤无机氮总量通过前期相同土样培养21 d的矿化和硝化实验获得,具体参考文献[21]。土壤硝酸还原酶活性测定基于 $\alpha$ -萘胺比色法,采用试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司生产)测定,具体测定步骤参照试剂盒说明书进行。土壤亚硝酸还原酶测定是以 $\text{NaNO}_2$ 为底物,经过24 h嫌气培养后,通过单位时间内 $\text{NO}_2^-$ -N的减少量来表征<sup>[25]</sup>。脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定。

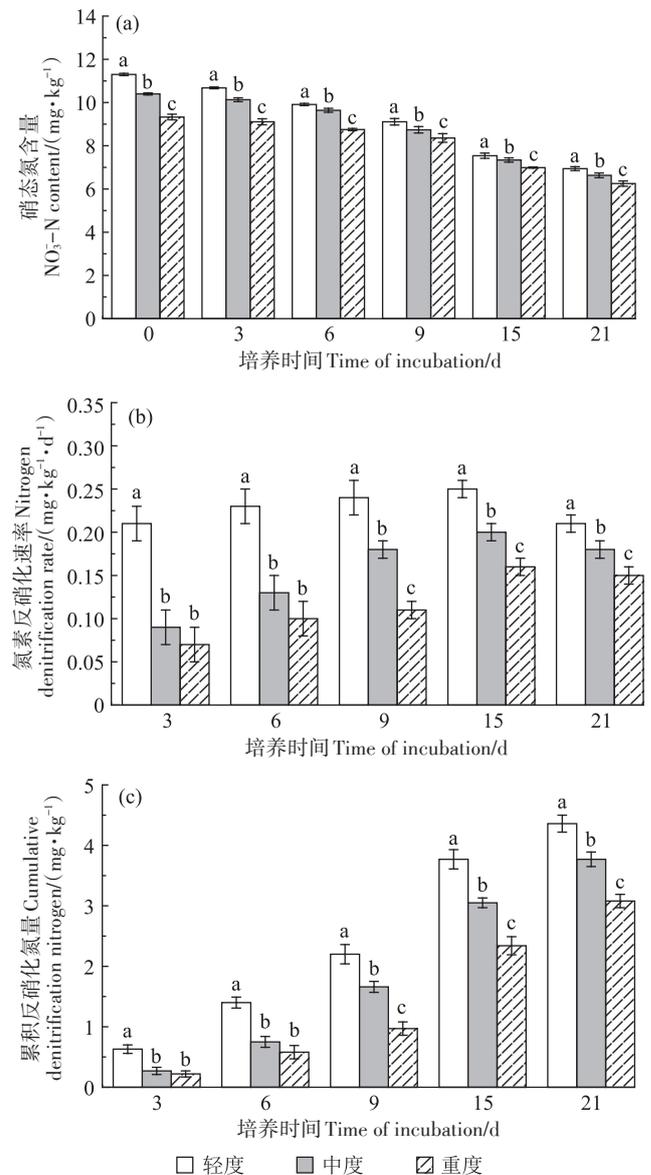
### 1.4 统计分析

实验数据采用Excel软件整理,统计分析采用SPSS22.0软件进行。利用Pearson相关分析法表征累积反硝化氮量、累积氨挥发量与土壤指标间的相互关系,由于参与培养实验的土样数量有限,其相关分析结果很难解释不同盐碱或养分指标对盐碱土反硝化作用和氨挥发作用的影响大小。因此,进一步引入逐步回归分析方法,为有效避免部分指标间可能产生共线性,将所有土壤指标划分为盐碱化参数、盐分离子和养分指标三类,每一类分别与累积反硝化氮量、累积氨挥发量进行逐步回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量、反硝化速率和累积反硝化氮量的变化

随着培养时间的增加,3种盐碱土 $\text{NO}_3^-$ -N含量逐渐下降,反硝化速率和累积反硝化氮量不断增加(图1)。培养初始时,轻度、中度和重度盐碱土之间的 $\text{NO}_3^-$ -N含量有显著差异,即轻度盐碱土的 $\text{NO}_3^-$ -N含量显著



不同小写字母表示同一测量时间的3种土壤间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significance of differences among the three soils at the same measurement time ( $P < 0.05$ ). The same below.

图1 不同盐碱土硝态氮含量、反硝化速率和累积反硝化氮量

Figure 1  $\text{NO}_3^-$ -N content, denitrification rate and cumulative denitrification nitrogen in different saline-sodic soils

高于中度和重度盐碱土( $P<0.05$ )。培养至第21天时,轻度、中度和重度盐碱土中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分别较培养初始时降低了38.6%、36.2%和33.0%,3种土壤的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量仍差异显著。

整个培养过程中,轻度盐碱土的反硝化速率始终显著高于中度和重度盐碱土(图1b)。培养3~6 d时,中度与重度盐碱土的反硝化速率没有显著差异,而轻度盐碱土的反硝化速率显著高于前二者( $P<0.05$ )。随着培养时间的增加,3种不同盐碱土的氮素反硝化速率均呈现先增加后降低的趋势,第15 d达到峰值,轻度、中度和重度盐碱土氮素反硝化速率分别较培养3 d时增加了0.2、1.3倍和1.1倍。中度和重度盐碱土反硝化速率分别较轻度盐碱土低18.9%和37.8%,差异显著( $P<0.05$ )。

随着培养时间的增加,不同盐碱土累积反硝化氮量不断升高(图1c)。培养3~6 d时,中度与重度盐碱土的累积反硝化氮量没有显著差异,二者均显著低于轻度盐碱土( $P<0.05$ )。培养至第21天时,轻度、中度和重度盐碱土中累积反硝化氮量分别较培养3 d时增加了6.0、13.2倍和13.0倍。中度和重度盐碱土累积反硝化氮量分别较轻度盐碱土低13.7%和29.4%,差异显著( $P<0.05$ ),即随着土壤盐碱化程度增加,累积反硝化氮量呈降低趋势。

## 2.2 土壤氨挥发速率和累积氨挥发量变化

由图2可见,培养初始时(第3天),3种不同盐碱土的氨挥发速率最大,轻度、中度和重度盐碱土氨挥发速率分别达 $1.75$ 、 $2.29$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $2.89$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,中度和重度盐碱土氨挥发速率分别较轻度盐碱土高30.8%和64.8%,差异显著( $P<0.05$ )。随着培养时间的增加,氨挥发速率逐渐降低,培养至第21天时,轻度、中度和重度盐碱土氨挥发速率分别较培养3 d时降低了63.6%、62.0%和64.8%,仍保持中度和重度盐碱土氨挥发速率显著高于轻度盐碱土的变化趋势。

不同盐碱土累积氨挥发量随着培养时间的增加均呈逐渐增加的趋势(图2b)。整个培养过程中(3~21 d),中度和重度盐碱土累积氨挥发量均显著高于轻度盐碱土( $P<0.05$ )。培养第21天时,轻度、中度和重度盐碱土中累积氨挥发量分别较培养3 d时增加了1.5、1.7倍和1.5倍。中度和重度盐碱土累积氨挥发量分别较轻度盐碱土高36.6%和59.4%,差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 土壤反硝化和氨挥发过程相关酶活性变化

在众多土壤酶中,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶与

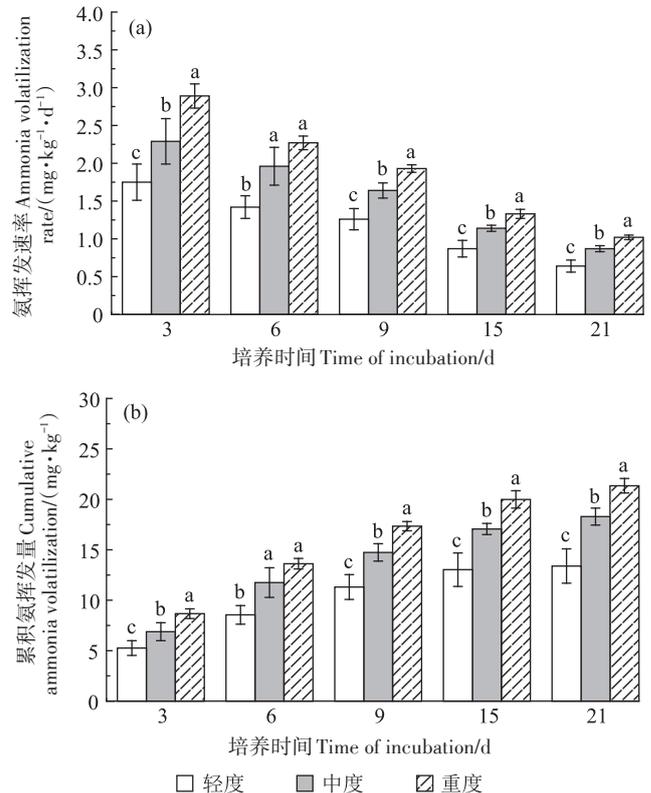


图2 不同盐碱土氨挥发速率和累积氨挥发量

Figure 2 Ammonia volatilization rate and cumulative ammonia volatilization in different saline-sodic soils

土壤氮素的反硝化作用关系密切。随着培养时间的增加,不同盐碱土硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性均呈现出先增加后降低的趋势(图3)。培养初始时,轻度盐碱土的硝酸还原酶活性显著高于中度和重度盐碱土( $P<0.05$ ),而中度与重度盐碱土硝酸还原酶活性没有显著差异。随着培养时间的增加,不同盐碱土的硝酸还原酶活性逐渐增强,培养至第9天时,轻度、中度和重度盐碱土硝酸还原酶活性分别较培养初始时增加了1.5、2.4倍和2.9倍。中度和重度盐碱土硝酸还原酶活性分别较轻度盐碱土低8.0%和15.6%。继续培养,则3种不同盐碱土的硝酸还原酶活性均逐渐下降,轻度与中度盐碱土间差异不显著,轻度与重度盐碱土间差异显著(图3a)。

与硝酸还原酶活性变化相似,3种不同盐碱土的亚硝酸还原酶活性随着培养时间的增加也呈先升高后降低的趋势,但变化幅度较小(图3b)。培养初始时,轻度、中度与重度盐碱土的亚硝酸还原酶活性也具有显著差异( $P<0.05$ )。随着培养时间的增加,不同盐碱土的亚硝酸还原酶活性逐渐增加,在培养至第9天时,轻度、中度和重度盐碱土亚硝酸还原酶活性分

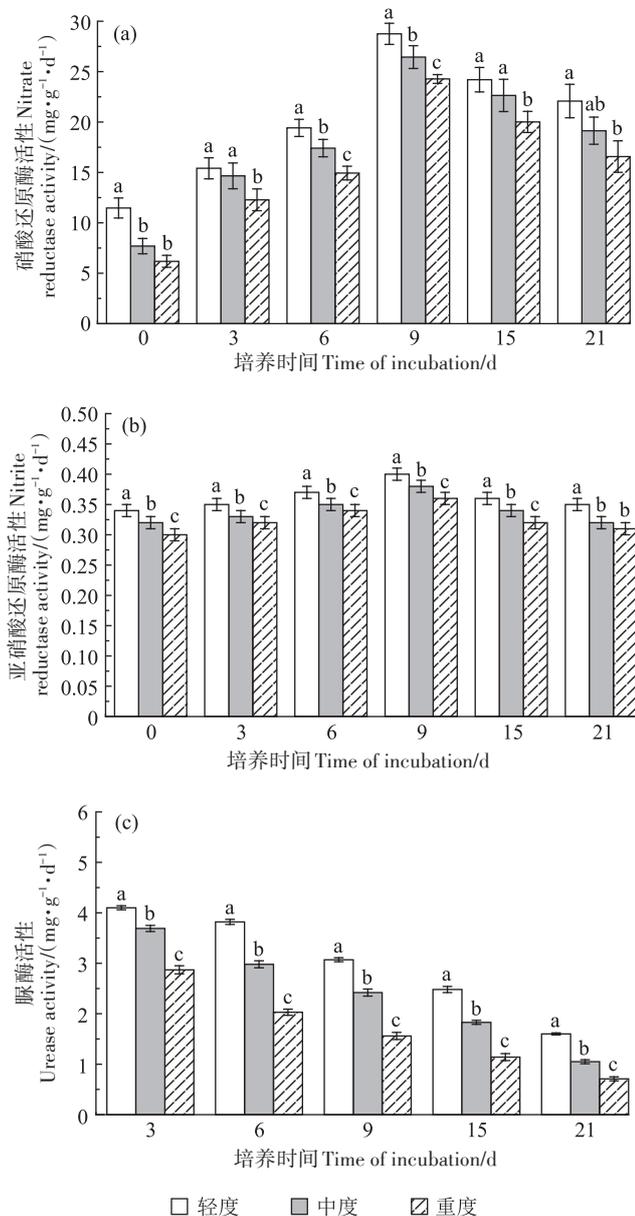


图3 不同盐碱土硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和脲酶活性

Figure 3 Nitrate reductase, nitrite reductase and urease activities in different saline-sodic soils

别较培养初始时增加了17.0%、17.7%和19.4%。中度和重度盐碱土的亚硝酸还原酶活性分别较轻度盐碱土低5.3%和9.8%。继续培养,则3种不同盐碱化土壤的亚硝酸还原酶活性均逐渐下降,但仍保持中度和重度盐碱土亚硝酸还原酶活性显著低于轻度盐碱土的变化趋势,二者间的差异则越来越小且不显著。

随着培养时间的增加,不同盐碱土的脲酶活性均呈现出不断降低的趋势(图3c)。培养开始时,轻度、中度和重度盐碱土的脲酶活性分别为整个培养过程中的最高值,且表现出土壤盐碱程度越高,脲酶活性越低,中度和重度盐碱土的脲酶活性分别较轻度盐碱土低10.0%和29.8%,差异显著( $P<0.05$ )。随着培养时间的增加,3种盐碱土的脲酶活性逐渐降低,培养至第21天时,轻度、中度和重度盐碱土的脲酶活性分别较培养3 d时降低了61.1%、71.6%和75.4%,盐碱程度越高,脲酶活性降低幅度越大,差异显著( $P<0.05$ )。

#### 2.4 氮素反硝化和氨挥发的影响因子分析

随着土壤盐碱化程度的增大,土壤反硝化速率、累积反硝化氮量、氨挥发速率及累积氨挥发量等几乎与所有的盐碱化参数、盐分离子含量和养分指标一致,呈现规律性的增大或降低。土壤盐碱化参数、盐分离子和养分指标与累积反硝化氮量、累积氨挥发量间的逐步回归分析结果列于表2。由表2可知,在土壤盐碱化参数中,EC和ESP是影响累积反硝化氮量的主要因素,且EC作用大于ESP,EC是影响累积氨挥发量的主要因素;在土壤盐分离子中, $\text{CO}_3^{2-}$ 是影响累积反硝化氮量和累积氨挥发量的主要因素;在土壤养分指标中,TN是影响累积反硝化氮量的主要因素,SOM是影响累积氨挥发量的主要因素。

### 3 讨论

本研究结果显示,随着土壤盐碱化程度的增加,

表2 土壤不同指标与累积反硝化氮量和氨挥发量的逐步回归分析

Table 2 Stepwise regression analysis of different soil indexes with cumulative denitrification nitrogen and ammonia volatilization

氮素转化过程		因子	常数	系数	拟合度	$P$	
Nitrogen transformation process		Factor	Constant	Coefficient	$R^2$		
累积反硝化氮量 Cumulative denitrification nitrogen	土壤盐碱化参数 Soil salinization parameter (pH、EC、ESP、SSC)	EC	4.943	-1.374	0.971	0.017	
		ESP	4.943	-0.018	0.933	0	
		土壤盐分离子 Soil salt ion ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ )	$\text{CO}_3^{2-}$	4.760	-0.021	0.968	0.023
累积氨挥发量 Cumulative ammonia volatilization	土壤养分指标 Soil nutrient index (AN、AP、AK、TN、SOM)	TN	0.566	10.600	0.930	0.007	
累积氨挥发量 Cumulative ammonia volatilization	土壤盐碱化参数 Soil salinization parameter (pH、EC、ESP、SSC)	EC	8.993	17.213	0.918	0	
		土壤盐分离子 Soil salt ion ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ )	$\text{CO}_3^{2-}$	11.375	0.131	0.895	0.034
		土壤养分指标 Soil nutrient index (AN、AP、AK、TN、SOM)	SOM	28.871	-0.794	0.978	0.006

氮素的反硝化作用显著下降,氨挥发作用显著增强。土壤反硝化是氮素转化的重要过程,也是引起 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和氮素损失的主要途径之一<sup>[26]</sup>。有研究指出,土壤盐分对反硝化速率起重要的抑制作用<sup>[27]</sup>,是影响反硝化速率的主导因素<sup>[28]</sup>。张先富等<sup>[22]</sup>通过模拟实验研究发现,不同盐碱化条件对 $\text{NO}_3^-$ -N质量分数影响不显著, $\text{NaHCO}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 混合质量浓度变化对反硝化作用没有显著影响。然而,本研究结果表明,随着模拟培养土壤盐碱化程度的增加,相同时刻土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量、反硝化速率、累积反硝化量均有逐渐降低的趋势。培养21 d时,中度和重度盐碱土 $\text{NO}_3^-$ -N含量较轻度盐碱土分别降低4.4%和9.9%,反硝化率较轻度盐碱土分别降低18.9%和37.8%,累积反硝化氮量较轻度盐碱土分别降低13.7%和29.4%,充分说明土壤盐碱化程度对氮素反硝化过程具有抑制作用,且盐碱化程度越大,抑制程度越大。土壤盐碱化对氮素反硝化产生抑制的原因可能在于以下两方面,一是盐碱化首先抑制了氮素的硝化作用<sup>[21]</sup>,造成中度、重度盐碱土硝态氮含量显著低于轻度盐碱土,发生反硝化作用的土壤硝酸盐基质客观上明显较少,进而降低了反硝化速率;二是盐碱化抑制了相关土壤酶活性,造成与反硝化作用相关的硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性受到抑制(图3a),降低了其参与反硝化作用的数量。也有研究认为土壤盐离子(如 $\text{Na}^+$ )可以对土壤酶产生毒害作用,盐离子浓度过高会超出酶对盐度的耐受性,造成土壤酶的失活<sup>[29]</sup>。

氨挥发是农田氮肥损失的重要途径之一,尤其是受盐碱影响的我国北方稻田氨挥发往往成为氮素损失的主要途径<sup>[30-31]</sup>。无论在盐化土壤还是碱化土壤中,随着盐碱化程度的增加,氨挥发量都表现出显著增加的趋势<sup>[11]</sup>。通常,由于受盐碱影响土壤中会存在着较高的盐分浓度,减弱土壤对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附能力,促进 $\text{NH}_4^+$ 向 $\text{NH}_3$ 的转化,显著增大氨挥发速率<sup>[8]</sup>;同时盐碱土中过量的盐分和高pH又会抑制硝化作用的进行<sup>[21]</sup>,造成 $\text{NH}_4^+$ -N的暂时性累积,也会增加氨挥发发生<sup>[32]</sup>。本研究结果再次表明,随着土壤盐碱化程度的增加,氨挥发速率和累积氨挥发量均不断增加。本研究数据仅仅是实验室模拟结果,如果考虑到田间风力作用、气温变化以及施氮量的增加,盐碱化程度大的土壤氨挥发量可能更会成倍增加<sup>[31,33]</sup>,因此未来盐碱化稻田的氨挥发问题应引起相关部门的高度重视。

土壤反硝化和氨挥发作为氮素气态损失的主要途径,除受到土壤自身化学性质的影响,还与土壤中

微生物活性密切相关,特别是一些相关土壤酶的活性已成为土壤氮素周转和有效性的重要指示因子,如硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性大小直接反映了土壤反硝化能力的强弱<sup>[34]</sup>,脲酶活性大小则直接影响土壤氨挥发的强度<sup>[35]</sup>。我们的研究表明,随着土壤盐碱化程度的增加,上述3种土壤酶的活性均呈下降趋势,所不同的是硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性随培养时间增加呈先升高后降低变化,而脲酶活性则呈直线下降变化(图3)。硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性变化与反硝化速率和累积反硝化氮量呈现了相同趋势,可能是由于培养初期土壤中硝态氮含量变化对土壤酶活性产生了诱导效应,而随着土壤盐碱化程度增大最终2种酶活性不断降低<sup>[32]</sup>,导致反硝化作用不同于氨挥发随盐碱化程度增加而增大,关于这种变化的主因究竟是化学作用还是生物作用至今还存在着一定争议<sup>[14-15]</sup>,具体机制也有待进一步研究。脲酶活性的这种变化可能是由于添加外源氮素增加了底物尿素浓度,使脲酶活性在培养初始时快速升高,尿素中酰胺不断水解为 $\text{NH}_4^+$ ,氨挥发作用迅速增强,随着时间延长底物浓度下降,脲酶活性也逐渐降低<sup>[23]</sup>。近年来,脲酶抑制剂和硝化抑制剂被广泛用于提高农田氮肥利用效率,减少氮损失<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,盐碱化土壤对相关酶活性也具有部分的抑制作用,因此,脲酶抑制剂和硝化抑制剂在盐碱化农田上的使用应该更加慎重。

苏打盐碱化稻田作为近年来我国新增的特殊农田生态系统,其在发挥保障国家粮食安全作用的同时,可能引发的环境效应也不容小觑,我们前期研究结果也证实了土壤盐碱化可增加氮素氨挥发损失,这也是盐碱化地区农田氮肥利用效率偏低的一个重要原因<sup>[36]</sup>。盐碱化土壤反硝化和氨挥发可能受到多种因素影响,如土壤温度、水分、质地以及气候条件等<sup>[37]</sup>,土壤的盐碱状况自然也是其中非常重要的因素,如有研究指出土壤反硝化速率与电导率呈显著负相关<sup>[27]</sup>,与土壤全氮含量呈显著正相关<sup>[38]</sup>,氨挥发与电导率呈显著正相关<sup>[39]</sup>,与土壤有机质含量呈负相关<sup>[40]</sup>,等等。随着土壤中EC或ESP的增加,潜在反硝化率降低<sup>[41]</sup>,氨挥发损失增加<sup>[31]</sup>。本研究利用逐步回归分析发现,EC、ESP、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和TN是影响反硝化过程的主要因素,累积反硝化氮量与EC、ESP、 $\text{CO}_3^{2-}$ 呈显著负相关,与TN呈显著正相关;EC、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和SOM是影响氨挥发过程的主要因素,累积氨挥发量与EC、 $\text{CO}_3^{2-}$ 呈显著正相关,与SOM呈显著负相关。究其原因,反硝

化氮量与TN呈显著正相关可能是因为土壤TN含量较高时,自然增加了反硝化反应底物浓度(即硝态氮浓度),使氮素转化反应更有利于向反硝化方向进行;而氨挥发与SOM呈显著负相关则是因为土壤中有机的增加,可增大土壤养分库容,使整个土壤体系具有更大的缓冲性能,进而减缓氨挥发反应的发生。苏打盐碱土的高EC和ESP主要是因为土壤中含有较多的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ <sup>[42]</sup>,土壤的EC、ESP等指标与 $\text{Na}^+$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 具有显著正相关关系<sup>[43]</sup>,因此较高的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 含量是影响苏打盐碱土反硝化和氨挥发速率,造成氮素氨挥发损失增加的根本原因。

本研究基于室内模拟培养实验初步揭示了土壤盐碱化程度对氮素反硝化和氨挥发损失的影响,由于模拟实验将土壤氮素各转化过程分开进行研究,虽是一种相对理想状态,但将反硝化或氨挥发过程与整个氮素转化分离在事实上是不存在的,土壤氮素转化往往是多个过程同时进行的,如矿化与硝化、硝化与反硝化等,模拟实验的结果也与大田状态下具有一定的差异。因此,今后在盐碱化土壤的氮素转化研究上应对各个转化过程同时进行监测,加强对各个过程间耦合关系的探索,同时要更多关注田间原位监测研究,重视大田试验对生产实践的指导作用,将科学研究与生产实践密切结合起来。

#### 4 结论

随着土壤盐碱化程度的增加,氮素反硝化速率和累积反硝化氮量不断降低,氨挥发速率和累积氨挥发量不断增加,硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和脲酶活性也呈降低趋势。土壤盐碱化虽然抑制了反硝化作用,但增强了氨挥发作用,综合造成氮素损失的增加。究其原因,主要是苏打盐碱土含有较高的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ ,造成土壤较高EC和ESP,较低的TN和SOM含量,成为影响土壤反硝化和氨挥发的主要因素。本模拟培养实验在一定程度上明确了土壤盐碱化对氮素反硝化和氨挥发的影响规律,但可能与田间实际状况具有一些差异,今后要通过开展田间原位监测研究进一步加以验证。

#### 参考文献:

[1] 杨劲松,姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(增刊1):162-170. YANG J S, YAO R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(Suppl1): 162-170.

[2] HUANG L H, LIANG Z W, SUAREZ D L, et al. Effects of continuous nitrogen application on seed yield, yield components and nitrogen use efficiency of *Leymus chinensis* in two different saline-sodic soils of northeast China[J]. *Crop & Pasture Science*, 2019, 70:373-383.

[3] 黄立华,沈娟,冯国忠,等. 不同氮磷钾肥配施对盐碱地水稻产量性状和吸肥规律的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(2):216-219. HUANG L H, SHEN J, FENG G Z, et al. Effects of combined application of N, P and K on rice yields and regular of absorbing nutrients on saline-alkaline land[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(2):216-219.

[4] 张唤,黄立华,李洋洋,等. 东北苏打盐碱地种稻研究与实践[J]. 土壤与作物, 2016, 5(3):191-197. ZHANG H, HUANG L H, LI Y Y, et al. Research and experience of rice planting in saline-sodic soil in northeast China[J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(3):191-197.

[5] 尹娟,费良军,田军仓,等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):189-191. YIN J, FEI L J, TIAN J C, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6):189-191.

[6] 朱兆良. 稻田土壤中氮素的转化与氮肥的合理施用[J]. 化学通报, 1994(9):15-17, 22. ZHU Z L. Transformation of nitrogen in paddy soil and rational application of nitrogen fertilizer[J]. *Chemistry Bulletin*, 1994(9):15-17, 22.

[7] ZHAO X, ZHOU Y, WANG S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3):1068-1078.

[8] 史祺琦,余冬立,陈心逸,等. 盐分对土壤氨挥发与反硝化速率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11):1458-1464. SHI Z Q, SHE D L, CHEN X Y, et al. Effects of salinity on soil ammonia volatilization and denitrification rates[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(11):1458-1464.

[9] 牟晓杰,刘兴土,全川,等. 人为干扰对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8):1413-1419. MOU X J, LIU X T, TONG C, et al. Effects of human disturbance on nitrification and denitrification potential in the Min River estuarine wetland[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(8):1413-1419.

[10] MCCLUNG G, FRANKENBERGER W T. Soil nitrogen transformations as affected by salinity[J]. *Soil Science*, 1985, 139(5):405-411.

[11] 徐万里,张云舒,刘骅. 新疆盐渍化土壤氮肥氨挥发损失特征初步研究[J]. 生态环境, 2007, 16(1):176-179. XU W L, ZHANG Y S, LIU H. Preliminary study on the characteristics of ammonia volatilization from salinized soils in Xinjiang[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1):176-179.

[12] RAO D L N, BATRA L. Ammonia volatilization from applied nitrogen in alkali soils[J]. *Plant and Soil*, 1983, 70(2):219-228.

[13] HUANG L H, LIU X, WANG Z C, et al. Interactive effects of pH, EC and nitrogen on yields and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 194:48-57.

[14] DENDOOVEN L, ALCÁNTARA-HERNÁNDEZ R J, VALENZUELA-ENCÍNAS C, et al. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2010, 42(6):865-877.
- [15] PATHAK H, RAO D L N. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30:695-702.
- [16] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(3):416-427. NIU S Q, YANG J W, HU L, et al. Relationship with soil microbial quantity, soil enzyme activity and physicochemical factor between different saline-alkali soil in Hexi Corridor in Spring[J]. *Microbiology China*, 2012, 39(3):416-427.
- [17] 岳中辉, 张兴义, 许景刚, 等. 黑土硝酸还原酶活性的分布特征[J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38(6):767-770. YUE Z H, ZHANG X Y, XU J G, et al. Distribution characteristics of nitrate reductase activity in black soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(6):767-770.
- [18] 张瑞雪, 杨洪强, 徐颖, 等. 不同覆盖材料对夏秋苹果根区土壤硝酸盐代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8):2452-2458. ZHANG R X, YANG H Q, XU Y, et al. Effects of different mulching materials on nitrate metabolism in soil of apple root-zone in summer and autumn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8):2452-2458.
- [19] 刘沐衡, 王贵云, 张彦东, 等. 牛场粪水添加外源添加物施用后对土壤氨挥发影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11):2568-2573. LIU M H, WANG G Y, ZHANG Y D, et al. Effects of exogenous additives in cattle farm slurry on soil ammonia volatilization after application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2568-2573.
- [20] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:196-197. The General Station for Soil and Fertilizer of Jilin Province. Soil in Jilin[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998:196-197.
- [21] 杨易, 黄立华, 肖扬, 等. 苏打盐碱化稻田土壤氮素矿化和硝化特征及其影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(10):1816-1827. YANG Y, HUANG L H, XIAO Y, et al. Characteristics and influencing factors of soil nitrogen mineralization and nitrification in saline-sodic paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10):1816-1827.
- [22] 张先富, 李卉, 洪梅, 等. 苏打盐碱土对氮转化的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(4):1145-1150. ZHANG X F, LI H, HONG M, et al. Effects of saline-alkali soil on nitrogen transformations[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(4):1145-1150.
- [23] 王欢, 郑西来, 辛佳. 土壤氨挥发影响因素及其与脲酶活性的关系研究[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(9):74-79. WANG H, ZHENG X L, XIN J. Influencing factors on ammonia volatilization and its relations with urease activity[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22(9):74-79.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-83. BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-83.
- [25] 王志杰, 孙志梅, 张丽莉. 一种检测土壤亚硝酸还原酶活性的分析方法[P]. 2007, 1979134A. 2007-06-13. WU Z J, SUN Z M, ZHANG L L. An analytical method for detecting nitrite reductase activity in soil[P]. 2007, 1979134A. 2007-06-13.
- [26] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 $N_2O$ 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6):840-844. WANG G L, HAO M D, CHEN D L. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(6):840-844.
- [27] 李家兵, 张宝珠, 朱雨晨, 等. 闽江河口短叶荇荇群落湿地沉积物反硝化强度对盐度的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(1):177-183. LI J B, ZHANG B Z, ZHU Y C, et al. Response of denitrification intensity to salinity concentrations in *Cyperus Malaccensis* sediments of the Min River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1):177-183.
- [28] 姜焕杰, 王东启, 陈振楼, 等. 环境因子对长江口滨岸沉积物反硝化速率影响[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(4):114-118, 140. LOU H J, WANG D Q, CHEN Z L, et al. Main environmental factors affecting denitrification rate in sediment of Yangtze estuarine coast[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(4):114-118, 140.
- [29] 邱金泉, 王静, 张雨山. 人工湿地处理高盐度污水的适用性及研究进展[J]. *工业水处理*, 2009, 29(11):1-3. QIU J Q, WANG J, ZHANG Y S. Applicability of constructed wetlands to the treatment of wastewater with high salinity and its research progress[J]. *Industrial Water Treatment*, 2009, 29(11):1-3.
- [30] 刘伯顺, 黄立华, 黄金鑫, 等. 我国农田氨挥发研究进展与减排对策[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(6):875-888. LIU B S, HUANG L H, HUANG J X, et al. Research progress toward and emission reduction measures of ammonia volatilization from farmlands in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6):875-888.
- [31] LI Y Y, HUANG L H, ZHANG H, et al. Assessment of ammonia volatilization losses and nitrogen utilization during the rice growing season in alkaline salt-affected soils[J]. *Sustainability*, 2017, 9(1):132.
- [32] 苏海英, 徐万里, 蒋平安, 等. 盐渍化土壤上不同类型氮肥氨挥发损失特征研究[J]. *新疆农业科学*, 2008, 45(2):236-241. SU H Y, XU W L, JIANG P A, et al. Study on ammonia volatilization characteristics of different types of N fertilizers in salinization soils[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(2):236-241.
- [33] 徐尚涛. 不同氮肥施入模式对苏打盐碱稻田氮素利用的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014:45-48. XU S T. Effects of different nitrogen application patterns on nitrogen utilization of paddy field in soda saline-alkali land[D]. Changchun: Jilin University, 2014:45-48.
- [34] 陈伟, 皇甫倩华, 孙从建, 等. 大气 $O_3$ 升高对小麦根际土壤微生物量和氮素转化酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(3):623-630. CHEN W, HUANGFU Q H, SUN C J, et al. Influence of elevated  $O_3$  and different wheat cultivars on soil enzymes involving in nitrogen transformation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3):623-630.
- [35] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4):1296-1301.

- DU J J, GOU C L, CUI Y D, et al. Effects of water retaining agent on ammonia volatilization and nutrient leaching loss from N, P and K fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1296-1301.
- [36] 肖辉, 程文娟, 王立艳, 等. 滨海盐碱地夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮累积特征[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(5): 168-174. XIAO H, CHENG W J, WANG L Y, et al. Nitrogen utilization efficiency and characteristics of soil nitrate nitrogen accumulation in summer maize in coastal saline areas[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(5): 168-174.
- [37] 李红强, 姚荣江, 杨劲松, 等. 盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3915-3924. LI H Q, YAO R J, YANG J S, et al. Influencing mechanism of soil salinization on nitrogen transformation processes and efficiency improving methods for high efficient utilization of nitrogen in salinized farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3915-3924.
- [38] 孙志高, 刘景双, 于君宝. 三江平原典型草甸小叶章湿地土壤的反硝化作用[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2010, 26(1): 117-122. SUN Z G, LIU J S, YU J B. Denitrification of nitrogen in typical meadow *Calamagrostis angustifolia* wetland soils in the Sanjiang plain[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2010, 26(1): 117-122.
- [39] 何飞飞, 梁运珊, 吴爱平, 等. 不同生物炭用量对酸性菜地土硝化作用的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(9): 2376-2383. HE F F, LIANG Y S, WU A P, et al. Effect of biochar on nitrification from vegetable-planting acid soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2376-2383.
- [40] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2614-2622. NI K, DING W X, CAI Z C. Ammonia volatilization from soil as affected by long-term application of organic manure and chemical fertilizers during wheat growing season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2614-2622.
- [41] YU H B, SONG Y H, XI B D, et al. Denitrification potential and its correlation to physico-chemical and biological characteristics of saline wetland soils in semi-arid regions[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1339-1346.
- [42] 李彬, 王志春, 梁正伟, 等. 吉林省大安市苏打碱土盐化与碱化的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 151-155. LI B, WANG Z C, LIANG Z W, et al. Relationship between salinization and alkalinization of sodic soil in Da'an City[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2): 151-155.
- [43] HUANG L H, LIU Y, FERREIRA F S J, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 215: 105222.

(责任编辑:叶飞)