

# 冻融循环对农田黑土可溶性氮组分的调控效应

隽英华<sup>1</sup>, 田路路<sup>2</sup>, 刘 艳<sup>1</sup>, 孙文涛<sup>1</sup>

(1. 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161; 2. 常德市农业委员会, 湖南 常德 415000)

**摘要:**为深入了解非生长季农田黑土氮素转化过程, 采用室内冻融模拟培养试验研究不同冻融因子[冻融温度(冻结温度: -3、-6、-9、-12、-15 °C; 融化温度: 2、5 °C)、冻融循环次数(1、3、6、10、15; 在-3 °C冻结6 d、2 °C融化1 d为1个冻融循环次数)、水分含量(10%、20%、30%)]对农田黑土可溶性氮组分含量的影响。结果表明, 较大的冻融温差(-15~-12 °C/2~5 °C)、适宜的冻融循环次数(1~3)和水分含量(20%~30%)是影响农田黑土可溶性氮组分含量的主要驱动因子。随着冻结温度降低, 冻融土壤可溶性无机氮(DIN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$ )和可溶性全氮(DTN)含量均显著增加, 以-15 °C冻结时最大, 分别为89.84、101.99 mg/kg, 而可溶性有机氮(DON)含量的变化行为受融化温度的协同影响。随着融化温度升高, 冻融土壤DIN、DON和DTN含量均无显著性变化。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤DIN含量显著降低, 以循环次数15时最小(83.21 mg/kg), 而DON和DTN含量均先升高后降低, 分别在循环次数6和3时达到最大值。随着水分含量增加, 冻融土壤DON和DTN含量均显著增加, 以水分含量30%时最大, 分别为20.57、107.62 mg/kg, 而DIN含量无显著性变化。可见, 冻融作用显著促进非生长季农田黑土氮素转化, 有利于土壤有效氮的累积。

**关键词:**冻融循环; 农田黑土; 可溶性无机氮; 可溶性有机氮; 可溶性全氮

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)01-0051-06

## Regulation Effects of Freeze-Thaw Cycles on Soluble Nitrogen Components in Farmland Black Soil

JUAN Yinghua<sup>1</sup>, TIAN Lulu<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, SUN Wentao<sup>1</sup>

(1. *Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161*; 2. *Changde City Agriculture Committee, Changde 415000, China*)

**Abstract:** In order to understand the nitrogen transformation process of non-growing season farmland black soil, the effects of different freezing and thawing factors on the content of soluble nitrogen components in farmland black soil were studied by indoor freezing and thawing simulated culture experiment. The results showed that the main driving factors affecting the content of soluble nitrogen in farmland black soil were large temperature difference of freezing and thawing, appropriate number of freezing and thawing cycles (1-3) and water content (20%-30%). With the decrease of freezing temperature, the contents of soluble inorganic nitrogen (DIN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) and soluble total nitrogen (DTN) in freezing-thawing soil increased significantly, and the highest values were 89.84, 101.99 mg/kg, respectively, at -15 °C. The content of soluble organic nitrogen (DON) was synergistically affected by melting temperature. With the increase of thawing temperature, the contents of DIN, DON and DTN in freezing-thawing soil did not change significantly. DIN content in freezing-thawing soil decreased significantly with the number of freezing-thawing cycles increasing, and reached the minimum (83.21 mg/kg) when the number of freezing-thawing cycles increased 15, while DON and DTN contents increased first and then decreased, and reached the maximum value when the number of freezing-thawing cycles increased 6 and 3, respectively. With the increase of water content, the contents of DON and DTN in freezing-thawing soil increased significantly, and the highest values were 20.57 and 107.62 mg/kg, respectively, when the water content was 30%, while DIN content had no significant change. In conclusion, freezing-thawing significantly promoted nitrogen conversion in non-growing season farmland black soil,

收稿日期: 2019-12-13

基金项目: 沈阳市科技计划项目(21-109-3-01)

作者简介: 隽英华(1979-), 男, 研究员, 博士, 从事作物施肥与土壤氮素转化的生物化学调控研究。

and was beneficial to soil available nitrogen accumulation.

**Key words:** Freezing–thawing cycles; Farmland black soil; Dissolved inorganic nitrogen; Dissolved organic nitrogen; Dissolved total nitrogen

氮是作物生长中不可缺少的矿质营养元素,但自然界中95%以上的氮素不能被作物直接吸收利用,需要通过微生物作用转化成有效态氮,进而被作物吸收利用。土壤中能水或盐溶液浸提出来的氮素称为可溶性氮素(DN, dissolved nitrogen),它是土壤氮素中最活跃的组分<sup>[1]</sup>。土壤中的可溶性氮素既可以直接被作物吸收利用,也可以被微生物同化成无效态氮,一定条件下还可能被淋洗或挥发,引起环境氮污染<sup>[2]</sup>;这些可溶性氮素可分为可溶性无机氮(DIN, dissolved inorganic nitrogen)和可溶性有机氮(DON, dissolved organic nitrogen)。目前,大多数研究集中在土壤DIN( $\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N}$ )的迁移、转化及其生态环境效应等方面<sup>[3-4]</sup>,而对DON变化行为及其生态环境效应方面的研究鲜有报道。DON是土壤有机氮中最活跃的组分,是土壤中溶解性有机氮的潜在来源<sup>[5]</sup>。土壤氮素有效性与氮矿化、氮固定、作物养分吸收特性、微生物活动等因素密切相关<sup>[6-7]</sup>。

土壤冻融循环是中高纬度和高海拔地区秋末春初最常见的一种自然现象<sup>[8]</sup>,主要是指由于季节或昼夜气温的变化使土壤温度在0℃上下波动而产生的反复冻结–融化过程<sup>[9]</sup>。冻融循环是土壤氮素循环和累积的关键调控因子<sup>[10]</sup>。冻融过程通过改变土壤的物理性状、水热条件、微生物群落结构及活性等改变土壤氮循环,进而影响土壤中可利用氮素的流失和作物对氮养分的吸收<sup>[11]</sup>。研究表明,冻融循环破坏土壤团聚体结构,提高土壤DIN和DON含量,促进土壤氮矿化<sup>[1, 12-13]</sup>。但也有研究表明,-3℃的冻融循环没有明显改变氮矿化过程<sup>[14]</sup>,甚至-8℃的冻融循环降低土壤氮矿化量<sup>[15]</sup>。因此,了解不同冻融条件下土壤可溶性氮组分构成及其含量变化,对于正确理解冻融循环对土壤氮素转化过程的影响意义重大。东北地区是气候变化、土壤冻融循环显著和氮素循环研究的重要区域,冬季冻融作用时间的长短和冻融循环次数直接影响土壤氮素养分的供应<sup>[16]</sup>。东北典型黑土主要分布在松嫩平原东部及北部的山前盆地,在长达半年的冬春季节里,土壤处于冻结–解冻状态,存在明显的季节性冻融现象<sup>[17-18]</sup>。鉴于此,本研究以东北农田黑土为对象,采用室内冻融模拟培养试验探讨不同冻融因子(冻融温

度、冻融循环次数、水分含量)对土壤可溶性氮组分含量的影响行为,以期为东北农田黑土氮素肥力保持和氮素管理提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤采样地点为吉林省公主岭市国家黑土土壤肥力和肥料效益长期定位监测站(始建于1977年;43°30'N、124°48'E),该区属于中温带半湿润大陆性季风气候,年均温度4~5℃,年均降雨量450~650mm,年均无霜期125~140d,有效积温2600~3000℃·d,年蒸发量1200~1600mm,年均日照时间2500~2700h。土壤类型为典型黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物。采样时间为2019年10月。采样时,先除去表层杂物,多点混合法采集0~20cm耕层土壤,将新鲜样品装入塑料袋后迅速带回实验室,挑取肉眼可见的细根、石块等杂物后分成两份,一份过2mm筛后4℃保存备用,另一份风干后,测定基础化学性质<sup>[19]</sup>:pH(5.80±0.07)、有机质(29.97±0.84)g/kg、全氮(N计)(1.77±0.07)g/kg、全磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ 计)(1.65±0.08)g/kg、全钾( $\text{K}_2\text{O}$ 计)(25.30±1.42)g/kg、碱解氮(N计)(180.45±4.12)mg/kg、有效磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ 计)(112.96±7.17)mg/kg、速效钾( $\text{K}_2\text{O}$ 计)(330.06±8.3)mg/kg。

### 1.2 冻融试验设计

取定量过筛后鲜土,用蒸馏水调节含水量至10%(质量含水量),放入10℃(模拟采样地区10月末~11月初田间原位土壤冻融循环初次发生时的平均气温)恒温培养箱中恒温预培养15d,使其恢复生物学活性。预培养期间每天透气并补充损失的水分。

#### 1.2.1 冻融温度模拟试验

称取200g风干土的预培养土壤于100mL培养瓶中平铺于瓶底,用蒸馏水调节含水量至15%(质量含水量),用带孔的保鲜膜封口,在某一冻结温度下冻结6d,然后在某一融化温度下融化1d,随机取样进行可溶性氮组分分析。冻结温度设定为:-3、-6、-9、-12、-15℃;融化温度设定为2、5℃。每个处理3次重复,并设置恒温2℃处理作为对照。试验期间每隔2d称重补充水分。

### 1.2.2 冻融循环次数模拟试验

采用1.2.1的方法,经过一定循环次数的冻融后,随机取样进行可溶性氮组分分析。冻融循环次数设定为:1、3、6、10、15。其中,在-3℃冻结6d、在2℃融化1d设定为1个冻融循环次数。处理同1.2.1。

### 1.2.3 水分含量冻融模拟试验

采用1.2.1的方法,通过注射器均匀加蒸馏水调节含水量至10%、20%和30%(质量含水量),用带孔的保鲜膜封口,经过1个循环次数的冻融后(冻融循环次数设定同1.2.2),随机取样进行可溶性氮组分分析。处理同1.2.1。

### 1.3 测定方法

DIN( $\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N}$ )采用2 mol/L KCl溶液浸提,连续流动分析仪(AA3,德国布朗卢比公司)测定;可溶性全氮(DTN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;DON = DTN - DIN<sup>[20]</sup>。

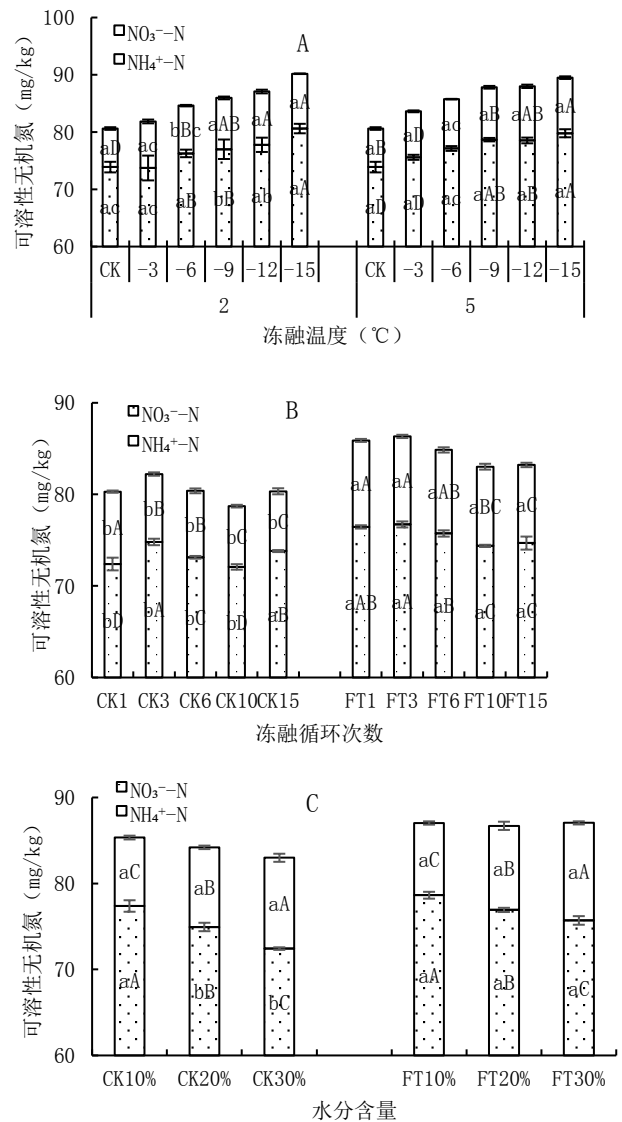
### 1.4 数据处理

数据采用Excel 2007和SPSS 19.0进行统计分析,采用Duncan's法进行多重比较;数值“采用平均值±标准差”的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融循环作用下农田黑土可溶性无机氮变化特征

冻融温度、冻融循环次数和水分含量对农田黑土DIN组分含量影响显著( $P < 0.05$ ),且以硝态氮为主(图1)。与对照相比,在冻结温度和冻融循环次数作用下,冻融土壤DIN组分( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ )含量均显著增加,但增加幅度因冻融温度和冻融循环次数而异(图1A、图1B);在不同水分含量作用下,除水分含量20%和30%硝态氮含量显著增加外,其他冻融土壤DIN组分含量均无显著性变化(图1C)。随着冻结温度降低,冻融土壤硝态氮和铵态氮含量均显著增加,以-15℃冻结时最大,分别为80.20 mg/kg(平均值)和9.64 mg/kg(平均值),较-3℃冻结时分别增加7.43%和19.33%(图1A)。随着融化温度升高,除-6℃冻结铵态氮含量和-9℃冻结硝态氮含量显著增加外,其他冻融土壤DIN组分含量均无显著性变化(图1A)。随着冻融循环次数增加,冻融土壤硝态氮和铵态氮含量均显著降低,以循环次数15时最小,分别为74.68、8.53 mg/kg,较循环次数1时分别降低2.31%和9.69%(图1B)。随着水分含量增加,冻融土壤硝态氮含量显著降低,而铵态氮含量显著增加,以水分含量



注:柱图上方不同小写字母表示融化温度处理间、冻融与对照处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示冻结温度、冻融循环次数和水分含量处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ );CKn:循环次数n的对照处理;FTn:循环次数n的冻融处理;CKn%:水分含量n%的对照处理;FTn%:水分含量n%的冻融处理,下同

图1 冻融循环对农田黑土可溶性无机氮的影响

30%时达到极值,分别为75.70、11.34 mg/kg(图1C)。可见,较大的冻融温差(-15~-12℃/2~5℃)和适宜的水分含量(20%~30%)对冻融农田黑土DIN组分含量影响较大,且冻结温度作用程度高于融化温度。

### 2.2 冻融循环作用下农田黑土可溶性有机氮变化特征

冻融循环对农田黑土DON含量影响显著( $P < 0.05$ ),且影响程度因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异(图2)。与对照相比,除-15℃冻结/5℃融化处理显著升高外,其他冻融土壤DON含

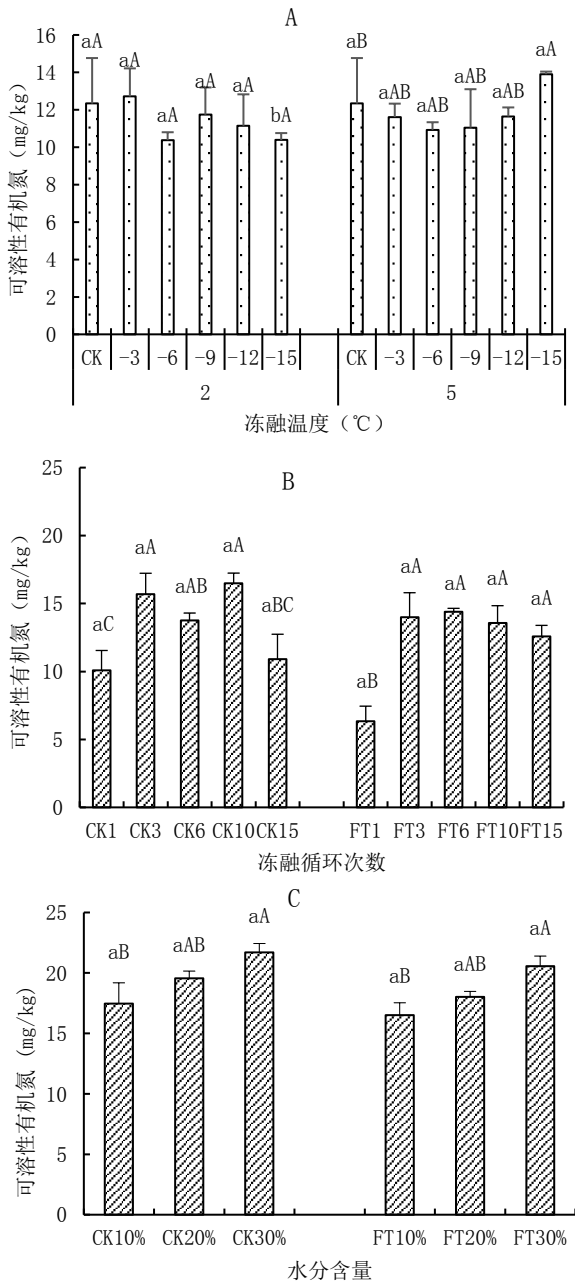


图2 冻融循环对农田黑土可溶性有机氮的影响

量均无显著性变化。随着冻结温度降低,冻融土壤DON含量变化行为因融化温度而异;2℃融化时无显著性变化,5℃融化时先降低后升高,仅在-15℃冻结时达到显著性水平,较-3℃冻结时增加8.58%。随着融化温度升高,除-15℃冻结显著升高外,其他冻融土壤DON含量均无显著性变化(图2A)。随着冻融循环次数增加,冻融土壤DON含量在循环次数3以前显著增加,增幅为120.50%;在循环次数3以后略有降低,但没有达到显著性水平(图2B);说明适宜的冻融循环次数(1~3)对冻融农田黑土DON含量影响程度较大。随着水分含量增加,冻融土壤DON含量显著增

加,以水分含量30%时最大(20.57 mg/kg),较水分含量10%时增加24.30%(图2C)。

### 2.3 冻融循环作用下农田黑土可溶性全氮变化特征

冻融循环对农田黑土DTN含量影响显著( $P < 0.05$ ),影响程度因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异(图3),且以DIN为主(图1、图2)。与对照相比,在冻融温度作用下,冻融土壤DTN含量显著增加(图3A);在冻融循环次数和水分含量作用下,除循环次数6和15显著升高外,其他冻融土壤DTN含量均无显著性变化(图3B、图3C)。随着冻结温度降低,冻融土壤DTN含量显著增加,以-5℃冻结时最大(平均值101.99 mg/kg),较-3℃

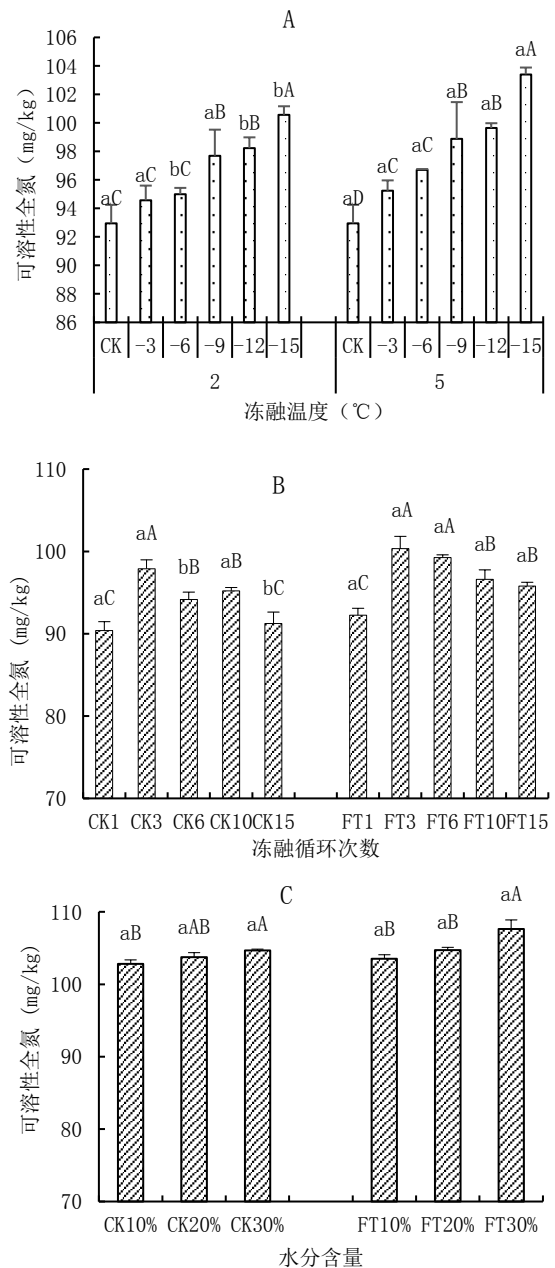


图3 冻融循环对农田黑土可溶性全氮的影响

冻结时增加 8.39%(平均值)。随着融化温度升高,除-6、-12、-15 °C冻结显著升高外,其他冻融土壤 DTN 含量均无显著性变化(图 3A)。说明较低的冻结温度(-12~-15 °C)对冻融农田黑土 DTN 含量影响较大。随着冻融循环次数增加,冻融土壤 DTN 含量先升高后降低,以循环次数 3 时达到极大值(100.33 mg/kg)(图 3B)。说明适宜的冻融循环次数(1~3)对冻融农田黑土 DTN 含量影响较大。随着水分含量增加,冻融土壤 DTN 含量显著增加,以水分含量 30% 时最大(107.62 mg/kg),较水分含量 10% 时增加 3.94%(图 3C)。

### 3 讨 论

氮矿化过程是有效态氮转化的起始过程,这对于土壤氮素迁移和转化乃至整个生态系统的氮素循环均至关重要<sup>[19]</sup>。本研究中,冻融循环显著增加农田黑土 DIN 组分含量。这是因为,一方面,冻融过程中部分微生物死亡,使得细胞内物质渗出,成为土壤中 DIN 的直接来源,同时死亡微生物为土壤中残留的微生物提供有效碳源,刺激残留微生物的活性,促进融化过程中土壤氮矿化速率的提高<sup>[13]</sup>;另一方面,冻融循环能够导致土壤中以前不可利用的有机和无机胶体中的铵态氮释放出来<sup>[21]</sup>,而且土壤中水分的迁移和冰水相变也增加代换性  $\text{NH}_4^{+}$ <sup>[19]</sup>。冻融温差、冻融循环次数和水分含量是影响土壤氮素转化的主要驱动因子。范志平等<sup>[22]</sup>研究认为,冻融温差和冻融频数对土壤无机氮含量影响显著,较大的冻融温差更容易引起土壤无机氮含量增加,这也佐证了本文的研究结果。此外,冻融温度也是影响土壤团聚体的重要因素。冻结温度越低,土壤稳定性团聚体越少<sup>[23]</sup>,稳定性较低的大团聚体被破坏成小团聚体,促进土壤有机质和微生物的接触,从而增强有机质的分解和矿化作用,因此增加了铵态氮含量<sup>[24]</sup>。本研究中,随着冻融循环次数增加,冻融农田黑土 DIN 组分含量均显著降低,这与田路路等<sup>[4]</sup>的研究结果一致。这是因为,一方面,黑土肥力较高,含有较高的速效氮含量[(180.45±4.12) mg/kg];另一方面,室内冻融模拟培养试验没有考虑作物养分吸收和淋溶、挥发等氮损失过程,因此在连续多次的冻融循环作用下,土壤氮矿化产物的累积抑制了有机氮的进一步矿化<sup>[25]</sup>。

本研究中,冻融循环对土壤 DON 和 DTN 含量影响显著。随着冻结温度降低,冻融土壤 DTN 含

量显著增加,这是因为土壤 DTN 中 DIN 占优势的缘故;而 DON 含量总体上无显著性变化,这与徐俊俊<sup>[26]</sup>的研究结果有相似之处。但也有研究表明,冻结温度越低,土壤稳定性团聚体越少,释放出的 DON 含量就越多<sup>[23, 27]</sup>。可见,冻融温度对土壤 DON 的影响结果受供试对象和试验方法的制约。随着冻融循环次数增加,冻融土壤 DON 和 DTN 含量均先增加后降低,以循环次数 3~6 时最大,说明短期冻融能够促进土壤 DON 的释放,这与 Grogan 等<sup>[8]</sup>的研究结论相一致。这是因为,一方面,冻融初期造成微生物大量死亡,释放大量的可溶性养分,连续的冻融循环使得土壤微生物逐渐适应这种环境温度变化,导致多次冻融过程中微生物死亡的绝对量逐渐减少,降低直接来自死亡微生物的小分子糖、氨基酸等 DON 组分含量<sup>[28]</sup>;另一方面,随着冻融循环次数增加,来自土壤团聚体释放的 DON 含量也逐渐降低,同时土壤中原有的 DON 却不断地被微生物利用分解,导致土壤中 DON 含量逐渐下降<sup>[29-30]</sup>。

含水量是影响土壤氮素转化的重要因素<sup>[31]</sup>,在一定湿度范围内,土壤氮素矿化速率随着湿度增加而增大,最大值出现在土壤含水量接近田间持水量时,超过最大田间持水量时矿化速率则会受到抑制<sup>[32-33]</sup>。本研究中,随着水分含量增加,冻融土壤硝态氮含量显著降低,而铵态氮含量显著增加。这是因为,土壤含水量主要是通过影响硝化和反硝化过程而对土壤 DIN 组分含量产生影响<sup>[34]</sup>,冻融过程中,较低土壤含水量有利于硝化作用的进行,有利于硝态氮的积累;而高含水量则有利于土壤氮素的反硝化作用,即有利于铵态氮的积累<sup>[35]</sup>。此外,冻融可以显著降低土壤团聚体稳定性,且以饱和含水量对土壤团聚体破碎能力最强,团聚体破碎过程中释放出更多的铵态氮<sup>[36]</sup>。随着水分含量增加,冻融土壤 DON 和 DTN 含量均显著增加,而  $\text{DIN}(\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N})$  含量无显著性变化。这是因为在田间持水量范围内,冻融作用对土壤物理性状的破坏作用随着水分含量增加而增大,进而导致更多的 DON 释放到土壤中<sup>[37]</sup>;由于 DIN 含量无显著性变化,DTN 的变化行为主要受 DON 含量的影响。

### 4 结 论

冻融农田黑土 DIN、DON 和 DTN 含量的变化行为受冻融温度、冻融循环次数和水分含量的协

同影响;其中,较大的冻融温差、适宜的冻融循环次数和水分含量是影响冻融农田黑土可溶性氮组分含量的主要驱动因子。可见,在季节性冻融期间,冻融作用显著促进非生长季农田黑土氮素转化,有利于土壤有效氮的累积,满足生长季初期作物氮素养分需求的同时,也增加土壤氮素的淋溶流失风险,但两者之间的效应关系还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5/6): 374-387.
- [ 2 ] Groffmann P M, Zak D R, Christensen S, et al. Early spring nitrogen dynamics in a temperate forest landscape [J]. *Ecology*, 1993, 73: 1579-1585.
- [ 3 ] 张维理,田哲旭,张宁,等.我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80-87.
- [ 4 ] 田路路,隗英华,刘艳,等.冻融作用对农田土壤可溶性氮组分的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 512-518.
- [ 5 ] Zhong Z K, Makeshin F. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 333-338.
- [ 6 ] Thebault A, Clement J C, Ibanez S, et al. Nitrogen limitation and microbial diversity at the treeline [J]. *Oikos*, 2014, 123: 729-740.
- [ 7 ] Perez C A, Hedin L O, Armesto J J. Nitrogen mineralization in two unpolluted old-growth forests of contrasting biodiversity and dynamics [J]. *Ecosystems*, 1998, 1: 361-373.
- [ 8 ] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641-654.
- [ 9 ] 王连峰,蔡廷江,解宏图.冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2361-2366.
- [ 10 ] Joseph G, Henry H A L. Soil nitrogen leaching losses in response to freeze-thaw cycles and pulsed warming in a temperate old field [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1947-1953.
- [ 11 ] Matzner E, Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 274-284.
- [ 12 ] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 215-238.
- [ 13 ] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1495-1505.
- [ 14 ] Eilson C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1723-1730.
- [ 15 ] Hentschel K, Borken W, Matzner E. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a forest soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 699-706.
- [ 16 ] 魏燕华,赵鑫,翟云龙,等.耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 87-95.
- [ 17 ] 李源,祝惠,袁星.冻融交替对黑土氮素转化及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1103-1109.
- [ 18 ] 栾英颖,郑德春,张国君.吉林省黑土资源现状及治理对策[J]. *东北农业科学*, 2018, 43(5): 41-42.
- [ 19 ] 郭冬楠,臧淑英,赵光影,等.冻融作用对小兴安岭湿地土壤溶解性有机碳和氮素矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 260-265.
- [ 20 ] 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: 12-196.
- [ 21 ] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implication for N and P availability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1): 247-255.
- [ 22 ] 范志平,李胜男,李法云,等.冻融交替对河岸缓冲带土壤无机氮和土壤微生物量氮的影响[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(4): 106-111.
- [ 23 ] Lehrsch G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy and organic matter [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1401-1406.
- [ 24 ] 王洋,刘景双,王全英.冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [ 25 ] Amador J A, Gorres J H, Savin M C. Role of soil water content in the carbon and nitrogen dynamics of *Lumbricus terrestris* L. burrow soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28: 15-22.
- [ 26 ] 徐俊俊.冻融交替对高寒草甸土壤氮素的影响[D].雅安:四川农业大学,2010.
- [ 27 ] 周旺明,王金达,刘景双,等.冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 1-6.
- [ 28 ] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freezing and thawing cycles in tundra and taiga soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8): 1061-1066.
- [ 29 ] 朴河春,刘广深,洪业汤.干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 1995, 14(6): 29-34.
- [ 30 ] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍.冻融交替对水稻土水溶性有机碳含量及有机碳矿化的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1052-1057.
- [ 31 ] Paul K L, Polglase P J, O'Connell A M, et al. Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 39-48.
- [ 32 ] Bernhard-Reversat F. Soil nitrogen mineralization under a Eucalyptus plantation and a natural Acacia forest in Senegal [J]. *Forest Ecology and Management*, 1988, 23: 233-244.

含量偏高,且有逐年上升的趋势;烟田速效磷含量偏高,较高和极高的比例较大,并处于逐年上升趋势;速效钾含量整体呈现偏高水平且有逐年急剧增高的趋势,且适宜水平所占比例较低(23.96%)。所以,在考虑当地实际情况的基础上,以土壤测试为依据建立施肥分区图,可以做到烟田区域“大配方”养分管理策略。以提高重庆涪陵烟叶质量为核心,制定出与重庆涪陵植烟土壤养分供应和烟草营养需求相匹配的各区域烟草肥料配方,可以做到烟田地块“小调整”养分管理策略,为涪陵烤烟特色优质可持续发展提供科学支撑,同时为烟草的稳健生长和烟叶的持续稳产提供良好的土壤环境。

### 参考文献:

- [1] 曹志洪. 优质烟叶生产的土壤与施肥[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1991:5-40.
- [2] 史瑞和. 植物营养原理[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1989:112-156.
- [3] 孙燕,高焕梅,和林涛. 土壤有机质及有机肥对烟草品质的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(20):6160-6162.
- [4] 肖汉乾,罗建新,王国宝,等. 湖南省植烟土壤养分丰缺状况的分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2003,29(2):150-153.
- [5] 王树会,邵岩,李天福,等. 云南12个地州植烟土壤养分状况与施肥对策[J]. 土壤通报,2006,37(4):684-687.
- [6] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等. 不同施肥模式对水稻养分吸收利用及土壤养分平衡的影响[J]. 东北农业科学,2018,43(1):1-8.
- [7] 李晓宁,高明,王子芳. 重庆市植烟土壤肥力数值化综合评价[J]. 西南农业学报,2007,20(1):67-71.
- [8] 杨剑虹,王成林,代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京:中国大地出版社,2008:26-79.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,1999:146-185.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京:农业出版社,1986:40-64.
- [11] 布伦纳J M. 土壤氮素分析法[M]. 北京:农业出版社,1981:208-230.
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社,1992:85-116.
- [13] 李芳明,王继红,李玲,等. 老参地土壤酸化的研究进展[J]. 吉林农业科学,2015,40(6):59-60.
- [14] 黄武,牟海燕,梁焯,等. 土壤酸化的防护与治理研究进展[J]. 四川化工,2019,22(5):9-13.
- [15] 邓小华,张瑶,田峰,等. 湘西植烟土壤pH和主要养分特征及其相互关系[J]. 土壤,2017,49(1):49-56.
- [16] 钱晓刚. 烟草营养与施肥[M]. 贵阳:贵州科技出版社,1998:58-62.
- [17] 周超,马宝新,刘海燕,等. 增密减氮对嫩单18产量和氮素利用率的影响[J]. 东北农业科学,2019,44(2):7-12.
- [18] 邹加明,单沛祥,李文璧,等. 大理州植烟土壤肥力质量现状与演变趋势[J]. 中国烟草学报,2002,8(4):14-20.
- [19] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1997:301-308.
- [20] 胡国松,郑伟,王震东,等. 烤烟营养原理[M]. 北京:科学出版社,2000:119-125.

(责任编辑:王昱)

(上接第56页)

- [33] Stanford G, Epstein E. Nitrogen mineralization-water relations in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38: 289-299.
- [34] 谢青琰,高永恒. 冻融对青藏高原高寒草甸土壤碳氮磷有效性的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):137-142.
- [35] 吕欣欣,孙海岩,汪景宽,等. 冻融交替对土壤氮素转化及相关微生物学特性的影响[J]. 土壤通报,2016,47(5):1265-1272.
- [36] 王风,韩晓增,李良皓,等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响[J]. 冰川冻土,2009,31(5):915-919.
- [37] Kvarno S H, Oygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway [J]. Catena, 2006, 67: 175-182.

(责任编辑:王昱)