

农田黑土氮素转化特征对冻融作用的响应

隽英华¹, 田路路², 刘艳¹, 孙文涛^{1*}

(1. 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁 沈阳 110161;

2. 常德市农业委员会, 湖南 常德 415000)

摘要: 为了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了不同冻融因子 [冻融温度 (冻结温度: -3、-6、-9、-12、-15℃; 融化温度: 2、5℃)、冻融循环次数 (1、3、6、10、15; 其中在 -3℃冻结 6 d、2℃融化 1 d 为 1 个冻融循环次数)、水分含量 (10%、20%、30%)] 对农田黑土无机氮组分含量及氮素转化速率的影响。结果表明, 较大的冻融温差 (-15℃/2 ~ 5℃)、适宜的冻融循环次数 (1 ~ 3) 和水分含量 (20% ~ 30%) 是影响农田黑土氮素转化的主要驱动因子。冻融土壤铵态氮含量、硝态氮含量、净氮矿化速率和硝化速率均随着冻结温度降低显著增加, 均随着融化温度升高无显著性变化。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤铵态氮含量、硝态氮含量、净氮矿化速率和硝化速率均显著降低。随着水分含量增加, 冻融土壤铵态氮含量显著增加, 这与硝态氮的变化趋势相反, 而净氮矿化速率和硝化速率均无显著性变化。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: 冻融作用; 农田黑土; 无机氮组分; 氮素转化速率

冻融作用是指土壤温度在 0℃ 上下波动而出现的反复冻结-融化过程, 这一现象普遍存在于中、高纬度及高海拔地区^[1]。冻融作用是作用于土壤的非生物应力, 通过改变土壤水分状况而影响土壤的物理、化学、生物等性质, 是影响土壤氮素生物地球化学过程的重要驱动力之一^[2]。氮素是植物生长不可缺少的矿质营养元素, 同时也在生态系统生物化学循环中扮演至关重要的角色^[3]。有机氮矿化是土壤氮素循环的重要组成部分, 矿化产生的铵态氮 (NH_4^+-N) 和硝态氮 (NO_3^--N) 为土壤微生物活动及植物生长提供了主要氮素来源^[4]。研究表明, 冻融作用能够加速土壤有机氮矿化, 提高有效氮水平^[5]。但也有研究表明, 冻融作用对土壤有效氮含量无显著影响, 甚至降低净氮矿化速率^[6-7]。关于冻融作用对土壤氮素转化过程影响研究的争议, 其原因可能是冻融土壤氮素转化受冻融温差、水分含

量、土壤理化特性等多因素的协同影响^[5, 8]。可见, 了解不同冻融条件下土壤有效氮组分构成及其含量变化, 对于正确理解冻融作用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和土壤冻融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^[9]。中国黑土资源主要分布在东北地区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, 土壤处于冻结和解冻状态, 存在明显的季节性冻融现象^[10]。关于冻融作用对土壤氮素转化过程的影响研究, 以往多集中在高山草甸、森林、苔原、湿地等生态系统^[11-12], 而对东北农田黑土的研究较少。为此, 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了不同冻融因子 (冻融温度、冻融循环次数、水分含量) 对土壤无机氮组分含量及氮素转化速率的影响行为, 以期深入了解冻融作用下农田黑土的供氮潜力, 为农田黑土氮素管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2013 年 10 月采自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), 该站地处松辽平原公主岭市吉林

收稿日期: 2019-01-10; 录用日期: 2019-03-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0300702、2018YFD0300303); 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLFC1807221); 国家自然科学基金 (41301253)。

作者简介: 隽英华 (1979-), 男, 山东莒南人, 研究员, 博士, 研究方向为作物施肥与土壤氮素转化的生物化学调控。E-mail: juanyong_001@sohu.com。

通讯作者: 孙文涛, E-mail: wentaosw@163.com。

省农业科学院试验地内 (N 43°30'、E 124°48'), 属中温带半湿润大陆性季风气候, 年均温度 4 ~ 5℃, 年均降水量 450 ~ 650 mm, 降水主要集中在 7、8 月份, 占全年的 60% ~ 70%, 雨热同季; 年均无霜期 125 ~ 140 d, 有效积温 2 600 ~ 3 000℃, 年均蒸发量 1 200 ~ 1 600 mm, 年均日照时间 2 500 ~ 2 700 h, 每年 12 月至第二年 3 月为土壤冻结期, 冻土厚度达 1.5 m。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, 先除去表层杂物, 多点混合法采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤, 将新鲜样品装入塑料袋后迅速带回实验室, 挑去肉眼可见的细根、石块等杂物后分成两份, 一份过 2 mm 筛后 4℃ 保存备用, 另一份风干后测定基础化学性质^[13]: pH 值 5.80 ± 0.07 、有机质 (29.97 ± 0.84) $g \cdot kg^{-1}$ 、全氮 (1.77 ± 0.07) $g \cdot kg^{-1}$ 、全磷 (0.72 ± 0.04) $g \cdot kg^{-1}$ 、全钾 (21.00 ± 0.70) $g \cdot kg^{-1}$ 、碱解氮 (180.45 ± 4.12) $mg \cdot kg^{-1}$ 、有效磷 (49.30 ± 3.13) $mg \cdot kg^{-1}$ 、速效钾 (273.99 ± 6.89) $mg \cdot kg^{-1}$ 。

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作用初次发生时的平均气温) 恒温培养箱中恒温预培养 15 d, 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

称取相当于 200 g 风干土的预培养土壤于 100 mL 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 6 d, 然后在某一融化温度下融化 1 d, 取样进行无机氮组分分析。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 2 d 称重补充水分。

1.2.2 冻融循环次数模拟试验

称取相当于 200 g 风干土的预培养土壤于 100 mL 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, 经过一定循环次数的冻融后, 取样进行无机氮组分分析。冻融循环次数设定为 1、3、6、10、15。其中, 在 -3℃ 冻结 6 d、在 2℃ 融化 1 d 设定为 1 个冻融循环次数。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 2 d 称重补充水分。

1.2.3 水分含量冻融模拟试验

称取相当于 200 g 风干土的预培养土壤于 100 mL 培养瓶中平铺于瓶底, 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 个循环的冻融后 (冻融循环设定同 1.2.2), 取样进行无机氮组分分析。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 2 d 称重补充水分。

1.3 测定方法

土壤无机氮含量 ($NH_4^+-N+NO_3^- -N$) 采用 $2 mol \cdot L^{-1}$ KCl 溶液浸提, 连续流动分析仪 (AA3, 德国) 测定^[13]。

1.4 数据处理

净氮矿化速率、硝化速率的计算公式如下^[14]:
 净氮矿化速率 ($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$) = (培养后无机氮含量 - 培养前无机氮含量) / 培养天数
 硝化速率 ($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$) = (培养后硝态氮含量 - 培养前硝态氮含量) / 培养天数

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 \pm 标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 冻融作用下农田黑土无机氮组分含量变化特征

冻融温度对农田黑土无机氮组分含量影响显著 ($P < 0.05$), 且以硝态氮为主 (图 1)。与对照相

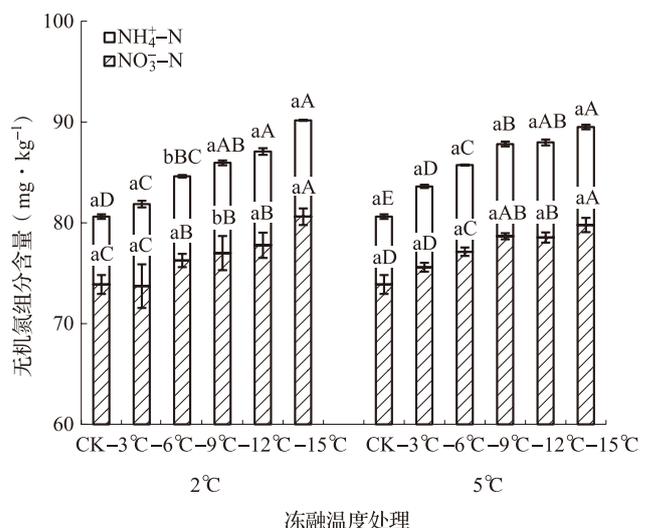


图 1 冻融温度对农田黑土无机氮组分含量的影响

注: 图柱上方不同小写字母表示融化温度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处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$); CK 为恒温 2℃ 对照处理。下同。

比, 冻融土壤硝态氮和铵态氮含量均显著增加, 增加幅度分别在 2.31% ~ 9.11% 和 1.12% ~ 20.87% 之间。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°C 冻结时最大, 分别为 $80.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值) 和 $9.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值), 较 -3°C 冻结时分别增加了 7.45% 和 19.34% (平均值)。随着融化温度升高, 除 -6°C 冻结铵态氮含量和 -9°C 冻结硝态氮含量显著增加外, 其它冻融土壤硝态氮和铵态氮含量均无显著性变化。可见, 较大的冻融温差 ($-15^{\circ}\text{C}/2 \sim 5^{\circ}\text{C}$) 造成了冻融土壤无机氮组分含量显著增加, 且冻结温度的作用程度高于融化温度。

冻融循环次数对农田黑土无机氮组分含量影响显著 ($P < 0.05$), 且以硝态氮为主 (图 2)。与对照相比, 冻融土壤硝态氮和铵态氮含量均显著增加, 增加范围分别在 $0.87 \sim 4.05$ 和 $1.54 \sim 2.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 且以循环次数 1 硝态氮含量和循环次数 15 铵态氮含量的增加幅度最大, 分别为 5.60% 和 30.69%。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤硝态氮和铵态氮含量从循环次数 3 开始均显著降低, 以循环次数 15 时达到极值, 分别为 74.68 和 $8.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较循环次数 1 时分别降低了 2.31% 和 9.69%。

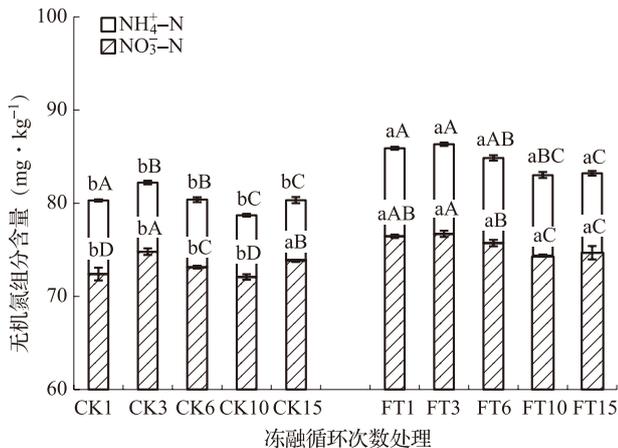


图 2 冻融循环次数对农田黑土无机氮组分含量的影响

注: 图柱上方不同小写字母表示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融循环次数处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$); CKn: 循环次数为 n 的对照处理; FTn: 循环次数为 n 的冻融处理。下同。

水分含量对冻融农田黑土无机氮组分含量影响显著 ($P < 0.05$), 且以硝态氮为主 (图 3)。与对照相比, 除水分含量 20% 和 30% 硝态氮含量显著增加外, 其它冻融土壤硝态氮和铵态氮含量

均无显著性变化。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 30% 时达到极值, 分别为 75.70 和 $11.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较水分含量 10% 时分别增加了 -3.72% 和 35.02% 。说明适宜的水分含量 (20% ~ 30%) 对冻融农田黑土无机氮组分含量影响程度较大。

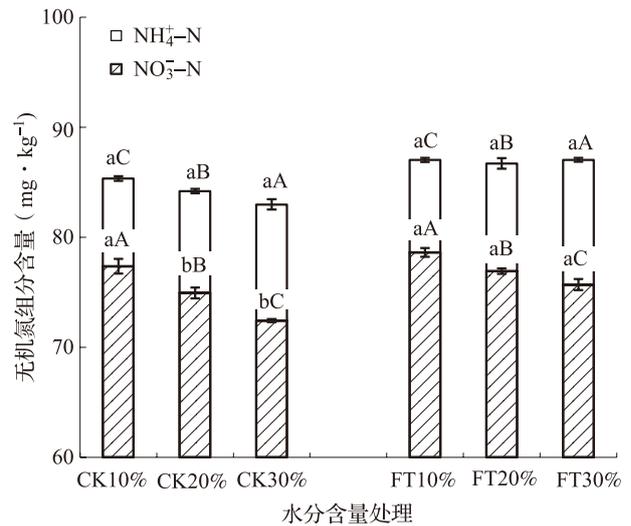


图 3 水分含量对冻融农田黑土无机氮组分含量的影响

注: 图柱上方不同小写字母表示冻融与对照处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示水分含量处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$); CKn%: 水分含量 n% 的对照处理; FTn%: 水分含量 n% 的冻融处理。下同。

2.2 冻融作用下农田黑土氮素转化速率变化特征

冻融作用对农田黑土硝化速率影响显著 ($P < 0.05$), 且变化行为因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异 (图 4)。与对照相比, 冻融土壤硝化速率明显增加, 但增加幅度因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异 (图 4)。随着冻结温度降低, 冻融土壤硝化速率显著增加, 以 -15°C 冻结时最大 (平均值 $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 较 -3°C 冻结时平均增加 53.93%。随着融化温度升高, 冻融土壤硝化速率无显著性变化 (图 4a)。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤和对照土壤硝化速率均显著降低, 至循环次数 3 以后两者之间均无显著性差异 (图 4b); 说明短期冻融 (循环次数 1 ~ 3) 对土壤硝化速率影响程度较大。随着水分含量增加, 冻融土壤硝化速率无显著性变化, 而对照土壤显著降低, 以水分含量 30% 时最低 ($0.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 较水分含量 10% 时降低了 47.01% (图 4c)。

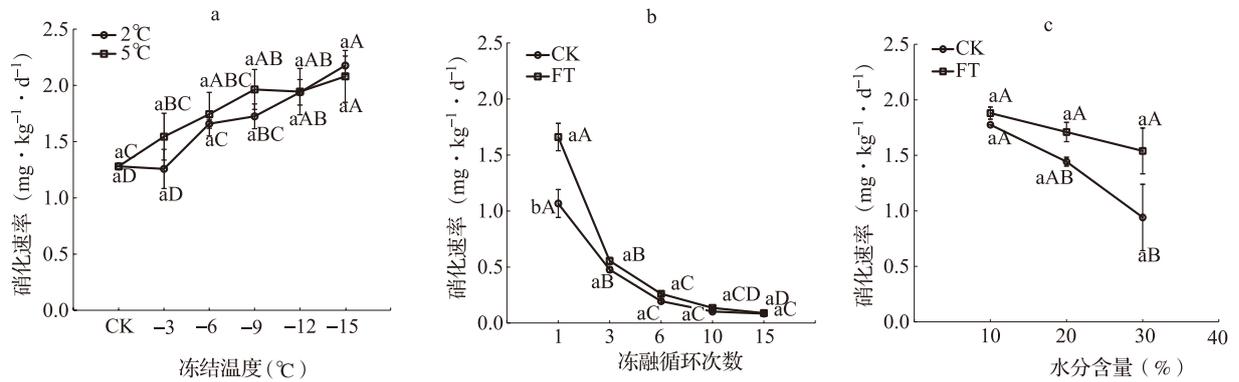


图4 冻融作用对农田黑土硝化速率的影响

注: a: 冻融温度影响; b: 冻融循环次数影响; c: 水分含量影响; FT: 冻融处理。下同。

冻融作用对农田黑土净氮矿化速率影响显著 ($P < 0.05$), 且变化行为因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异 (图 5)。与对照相比, 冻融土壤净氮矿化速率明显增加, 但增加幅度因冻融温度、冻融循环次数和水分含量而异 (图 5)。随着冻结温度降低, 冻融土壤净氮矿化速率显著增加, 以 -15°C 冻结时最大 (平均值 $2.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 较 -3°C 冻结时平均增加 83.65%。随着融化温度升

高, 冻融土壤净氮矿化速率无显著性变化 (图 5a)。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤和对照土壤净氮矿化速率均显著降低, 至循环次数 15 时两者之间无显著性差异, 差值仅为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 5b)。随着水分含量增加, 冻融土壤净氮矿化速率无显著性变化, 而对照土壤显著降低, 以水分含量 30% 时最低 ($1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 较水分含量 10% 时降低了 22.98% (图 5c)。

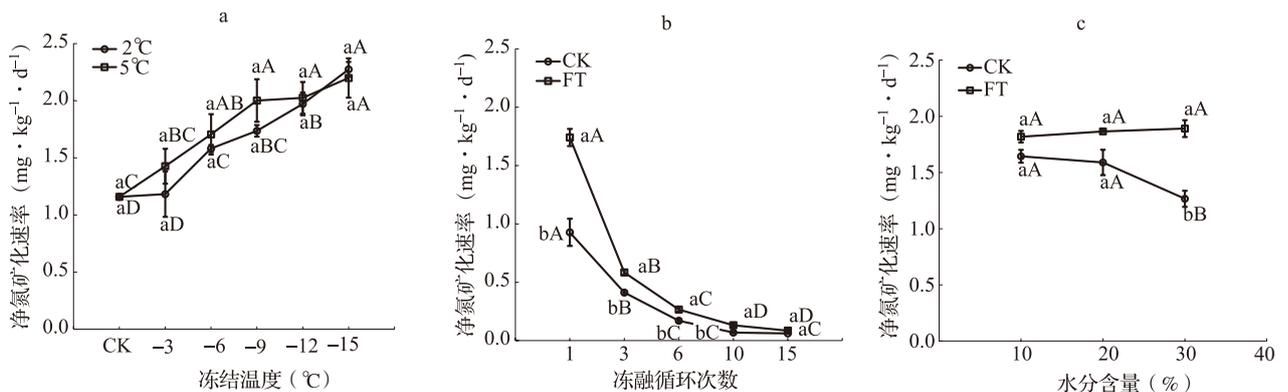


图5 冻融作用对农田黑土净氮矿化速率的影响

3 讨论

冻融作用通过改变土壤水分状况及分布影响土壤理化性质和微生物活动, 进而导致土壤养分含量变化^[15]。本研究表明, 冻融作用造成农田黑土无机氮组分含量显著增加 (图 1 ~ 3)。这是因为: 一方面, 冻融作用能够杀死一部分微生物, 造成细胞破裂, 直接将微生物体内的小分子糖、氨基酸等养分释放到土壤中^[16]; 另一方面, 由于死亡微生物为残留微生物提供了足够的底物养分, 激发了残留微生物活性, 促进了土壤有机氮的矿化^[17]。土壤中非生

物源氮对无机氮也有贡献。Freppaz 等^[18]研究认为, 冻融可能导致土壤中以前不可利用的有机和无机胶体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放出来。徐俊俊^[19]和胡霞等^[20]研究发现, 季节性冻融后土壤铵态氮和硝态氮含量均增加, 这也证实了本文的研究结论。而刘金玲等^[21]和李志萍等^[22]研究发现, 季节性冻融后土壤铵态氮和硝态氮含量均减少, 表现出明显的氮素固持现象; 这可能与植被类型、土壤特性等因素有关。

本研究表明, 较大的冻融温差 ($-15^{\circ}\text{C}/2 \sim 5^{\circ}\text{C}$) 造成了冻融土壤无机氮组分含量显著增加 (图 1), 这也佐证了范志平等^[23]的研究结论。Zhou 等^[24]通

过冻融模拟试验表明, 土壤无机氮含量与冻融循环次数呈正相关关系; 这与本文的研究结果(图2)相反, 这可能与铵态氮同化和反硝化作用的协同效应有关。随着水分含量增加, 冻融土壤硝态氮含量显著降低, 而铵态氮和无机氮($\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N}$)含量呈增加趋势(图3), 这也佐证了 Bernhard-Reversat^[25]和 Stanford等^[26]的研究结论: 在最大田间持水量范围内, 冻融土壤无机氮含量随着湿度增加而增大。

本研究表明, 冻融土壤净氮矿化速率和硝化速率均高于未冻结的对照土壤, 且净氮矿化速率的变化行为与硝化速率一致(图4~5), 这是因为土壤无机氮中硝态氮占优势的缘故。随着冻结温度降低, 冻融土壤净氮矿化速率和硝化速率均显著增加(图4a、图5a), 这是因为更低的冻结温度造成更多的土壤物理结构破坏和微生物死亡, 进而释放更多的养分^[27]; 再加上深冻期土壤温度相对稳定, 为幸存微生物提供了良好的生存环境, 激发了残留微生物活性^[28]。随着冻融循环次数增加, 冻融土壤净氮矿化速率和硝化速率均显著降低(图4b、图5b); 这是由于室内培养试验排除了植物吸收和降雨淋溶, 造成土壤中氮矿化产物积累, 累积的养分能够抑制有机氮的进一步矿化及铵态氮的进一步硝化, 使得土壤矿化及硝化氮量增加缓慢或降低^[29]。随着水分含量增加, 冻融土壤净氮矿化速率和硝化速率总体均呈降低趋势(图4c、图5c); 这是因为在田间持水量范围内, 冻融作用对土壤物理性状和微生物活性的破坏作用随着水分含量增加而增大, 进而抑制了微生物的活动^[30]。然而, Hentschel等^[31]在森林流域野外试验研究表明, 土壤净氮矿化速率受冻融作用影响不显著。可见, 冻融作用对土壤净氮矿化速率和硝化速率的影响结果受供试对象和试验方法的影响。

可见, 频繁的冻融循环势必会改变表层土壤氮素格局, 提高土壤无机氮水平, 改善生长季初期植物对养分的需求^[32]。但冻融作用多发生在植物非生长季, 造成土壤氮素供应与植物氮素利用在时间上的错位, 增加了土壤氮素的流失风险^[33], 进而导致农田生态系统养分的亏缺和氮素利用率的下降, 这些现象的内在作用机制有待于进一步研究。

4 结论

研究表明, 随着冻融温度、冻融循环次数和水分含量的变化, 冻融农田黑土铵态氮含量、硝态氮

含量、净氮矿化速率和硝化速率均明显变化。在本试验条件下, 较大的冻融温差($-15^\circ\text{C}/2\sim 5^\circ\text{C}$)、适宜的冻融循环次数(1~3, 其中在 -3°C 冻结6d、 2°C 融化1d为1个冻融循环次数)和水分含量(20%~30%)是影响冻融农田黑土氮素转化的主要驱动因子。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。

参考文献:

- [1] 王连峰, 蔡延江, 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.
- [2] 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.
- [3] Tateno R, Takeda H. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency above and below ground along a topographic gradient of soil nitrogen availability[J]. *Oecologia*, 2010, 163: 793-804.
- [4] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 505-508.
- [5] 隽英华, 刘艳, 田路路, 等. 冻融交替对农田棕壤氮素转化过程的调控效应[J]. 土壤, 2015, 47(4): 647-652.
- [6] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 191-213.
- [7] Hentschel K, Borken W, Zuber T. Effects of soil frost on nitrogen net mineralization, soil solution chemistry and seepage losses in a temperate forest soil[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15: 825-836.
- [8] 郑秀清, 樊贵盛, 邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Lehrs 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Rasion R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral N in situ[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(5): 524-530.
- [15] Judd K E, Likens G E, Buso D C, et al. Minimal response in watershed nitrate export to severe soil frost raises questions about

- nutrient dynamics in the Hubbard Brook experimental forest [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106 (3): 443–459.
- [16] Deluca T H, Keeney D R, Mccarty G W. Effect of freeze–thaw events on mineralization of soil nitrogen [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1992, 14 (2): 116–120.
- [17] 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 (10): 1495–1505.
- [18] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35 (1): 247–255.
- [19] 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.
- [20] 胡霞, 尹鹏, 王智勇, 等. 雪被厚度和积雪周期对土壤氮素动态影响的初步研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (4): 593–597.
- [21] 刘金玲, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融期间川西亚高山/高山森林土壤净氮矿化特征 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (3): 610–616.
- [22] 李志萍, 李维民, 吴福忠, 等. 川西亚高山森林林窗对不同关键时期土壤硝态氮和铵态氮的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27 (6): 270–274.
- [23] 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.
- [24] Zhou W M, Chen H, Zhou L, et al. Effect of freezing–thawing on nitrogen mineralization in vegetation soils of four landscape zones of Changbai Mountain [J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68: 943–951.
- [25] 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.
- [26] Stanford G, Epstein E. Nitrogen mineralization–water relations in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38: 289–299.
- [27] Haei M, Rousk J, Iistedt U, et al. Effects of soil frost on growth, composition and respiration of the soil microbial decomposer community [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 2069–2077.
- [28] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展 [J]. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 1032–1042.
- [29] 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 (1): 15–22.
- [30] 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.
- [31] Hentschel K, Borcken 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.
- [32] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (4): 1083–1094.
- [33] Yano Y, Shaver G R, Giblin A E. Nitrogen dynamics in a small arctic watershed: Retention and downhill movement of ¹⁵N [J]. *Ecological Monographs*, 2010, 80: 331–351.

Response of nitrogen transformation characteristics to freezing thawing cycles in the farmland black soil

JUAN Ying-hua¹, TIAN Lu-lu², LIU Yan¹, SUN Wen-tao^{1*} (1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161; 2. Changde City Agriculture Committee, Changde Hunan 415000)

Abstract: In order to deeply understand nitrogen (N) transformation process of farmland black soil during non-growing season, with a laboratory simulation experiment, the effects of different freezing–thawing factors [freezing and thawing temperatures (freezing temperature: -3, -6, -9, -12, -15 °C; thawing temperature: 2, 5 °C), freezing–thawing cycles (FTCs) number (1, 3, 6, 10, 15; FTCs number 1 consisted of freezing at -3°C for 6 days and subsequently thawing at 2°C for 1 day.), moisture regime (10%, 20%, 30%)] on the contents of inorganic N components and N transformation rate were investigated in the farmland black soil. The results showed that, the larger freezing–thawing temperature range (-15 °C / 2 ~ 5 °C) and the reasonable FTCs number (1 ~ 3) and moisture regime (20% ~ 30%) were the major driving factors affecting N transformation process of farmland black soil. The FTCs-treated soil ammonium N (NH₄⁺-N) content, nitrate N (NO₃⁻-N) content, net N mineralization rate and nitrifying rate all significantly increased with freezing temperature decreasing, and had no significant variations with thawing temperature increasing. With FTCs number increasing, the FTCs-treated soil NH₄⁺-N content, NO₃⁻-N content, net N mineralization rate and nitrifying rate all significantly decreased. With moisture regime increasing, the FTCs-treated soil NH₄⁺-N content significantly increased while the changes of NO₃⁻-N content was contrary, and net N mineralization rate and nitrifying rate both had no significant variations. Therefore, it is preliminarily concluded that FTCs could significantly promote N transformation of farmland black soil during non-growing season, and was beneficial to the accumulation of soil available N.

Key words: freezing–thawing cycles; farmland black soil; inorganic nitrogen components; nitrogen transformation rate