

冻融影响下黑土耕层剖面速效氮动态变化

谷际岐, 佟竺殷, 魏逸衡, 刘晓艺, 冯伟轩, 朱 轩, 张少良

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了探明冻融过程对东北典型黑土耕层氮(N)生物有效性的影响, 试验利用室内模拟方法, 探究了不同冻结温度、土壤容重、含水量、冻融循环次数影响下耕层土壤剖面速效氮(AN)的时空分布规律。结果表明, 经冻融循环后, 土壤 AN 含量随土层深度增加呈现波动性下降; 冻结温度越低, AN 随土层深度增加下降的波动性越大, AN 峰值、AN 土柱平均值越低; 冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时整个土柱 AN 平均值比 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低 $9.3\%\sim 44.6\%$; 容重增高, AN 含量降低, AN/TN 值升高, 土壤容重 1.1 g/cm^3 时整个土柱 AN 平均值比容重 1.0 g/cm^3 降低 $13.0\%\sim 18.6\%$, 容重 1.1 g/cm^3 整个土柱 AN/TN 平均值比容重 1.0 g/cm^3 显著提升 $0.6\sim 4.7$ 倍; 随着含水量的提高, 低容重(1.0 g/cm^3)表层(0—8 cm)AN 越高, 底层(20—30 cm)AN 越低, 而高容重(1.1 g/cm^3)土柱表层(4—8 cm)AN 越高, 表层(0—4 cm)AN、底层(20—30 cm)AN 越低; 在各个变量中, pH 大小与 AN 累积趋势呈负相关关系, 含水量、TDS、电导率、冻结温度均与 AN 含量成正相关, 是否冻融循环对 AN 垂直分布影响最大, 其次是恒温及冻融循环次数($p<0.05$)。研究结果可为黑土区冻融过程土壤 N 素管理、提升土壤肥力、减少 N 损失等问题提供理论依据和技术支撑。

关键词: 冻融循环; AN; AN/TN; 土壤水分; 冻结温度; 容重

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0295-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.02.039

Dynamics of Soil Available Nitrogen Influenced by Freeze Thaw Cycling in the Profiles of Plough Layer in Mollisol

GU Jiqi, TONG ZhuYin, WEI Yiheng, LIU Xiaoyi,

FENG Weixuan, ZHU Xuan, ZHANG Shaoliang

(College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

Abstract: In order to clarify the effects of freeze-thaw cycling (FTC) on the nitrogen (N) bioavailability in the cultivated layer in the mollisol, incubation method was explored to detect the vertical distribution of soil available nitrogen (AN) in the profile of different freezing temperatures, soil bulk density (BD), soil moisture, and FTC frequency. The results showed that after FTCs, soil AN contents decreased with the increasing soil depths. The lower the freezing temperature was, the greater the fluctuation of AN with increasing depth was. The lower the freezing temperature was, the lower the peak value and mean value of AN in soil column were. The mean value of AN in the entire soil column (0—30 cm) at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ was $9.3\%\sim 44.6\%$ lower than that at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; the increase of BD resulted in the AN value decreased and the AN/TN value increased. Compared with BD of 1.0 g/cm^3 , AN of BD 1.1 g/cm^3 was reduced by $13.0\%\sim 18.6\%$ in 0—30 cm soil depth, while AN/TN of BD 1.1 g/cm^3 significantly increased by $0.6\sim 4.7$ times. When the soil water contents increased, the AN increased in surface layer (0—8 cm) and decreased in low soil layer (20—30 cm) under low BD treatment (1.0 g/cm^3); while the AN increased in the layer of (4—8 cm) and decreased both of 0—4 cm and 20—30 cm soil depth under high BD treatment (1.1 g/cm^3). AN was negatively correlated with pH, while positively correlated to the soil moisture, TDS, conductivity, and freezing temperature. Both the FTC happened or not influenced vertical distribution of AN, followed by temperature and FTC frequency ($p<0.05$). This study aimed to provide the theoretical basis and technical support for soil N management during

收稿日期: 2020-09-01

资助项目: 东北农业大学大学生 SIPT 计划项目(201910224111); 国家自然科学基金项目(41771313)

第一作者: 谷际岐(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀、理论生态模型及苔藓空间分布格局研究。E-mail: gujiqui1998@163.com

通信作者: 张少良(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事侵蚀环境土壤养分和微塑料等的分布、运移和生态环境效应研究。E-mail: shaoliang.zhang@neau.edu.cn

定 AN 含量,凯氏定氮仪测定 TN 含量;pH 采用 pH 计(雷磁 PHS-3c)测定;溶解性固体(TDS)、电导率和电阻率采用电导率仪(雷磁 ddsj-318)测定。

1.3 数据处理

在 Excel 2019 中完成数据预处理,采用 Origin 2018 软件进行主成分分析,采用 SPSS 25 软件完成 Pearson 相关性分析、多元方差分析(MANOVA)和径向基神经网络自变量重要性分析。

2 结果与分析

2.1 冻融循环后不同冻结温度土壤剖面 AN 分布特征

土壤容重(1.0 g/cm^3)相同,各含水量处理,冻结温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤 AN 含量均随土层深度增加呈先减少后增加趋势,峰值过后逐渐降低,而冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤 AN 含量随土壤深度增加呈现“单峰”“双峰”“三峰”交替变换,但 2 种冻结温度条件下整体上 AN 均呈现下降趋势,且冻融温度越低,下降趋势越明显(图 2)。冻结温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤 AN 含量最高值出现在 12—20 cm 土层,而冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤 AN 含量最高值出现在 4—20 cm 土层。由此可见,冻结温度越低,AN 随土层深度增加波动性越大。

冻结温度越低,AN 峰值、AN 土柱平均值越低。当含水量为 15%,冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 AN 峰值(233.2 mg/kg)比 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (275.9 mg/kg)降低 15.5%;当含水量为 15%、冻融循环 15 次时,冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 AN 含量(128.2 mg/kg)比 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (231.5 mg/kg)显著降低 44.6%(图 2a, $p<0.05$)。

土壤容重(1.0 g/cm^3)相同,2 种冻融温度土柱 AN 差值随着土层深度增加波动性较大,整体含水量 15%,25%时 AN 差异呈增加趋势(图 3);2 种冻结温度在 12—16 cm 处、含水量 15%时差异最大,冻结温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 AN(179.1 mg/kg)比 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (254.6 mg/kg)降低 29.7%($p<0.05$)。

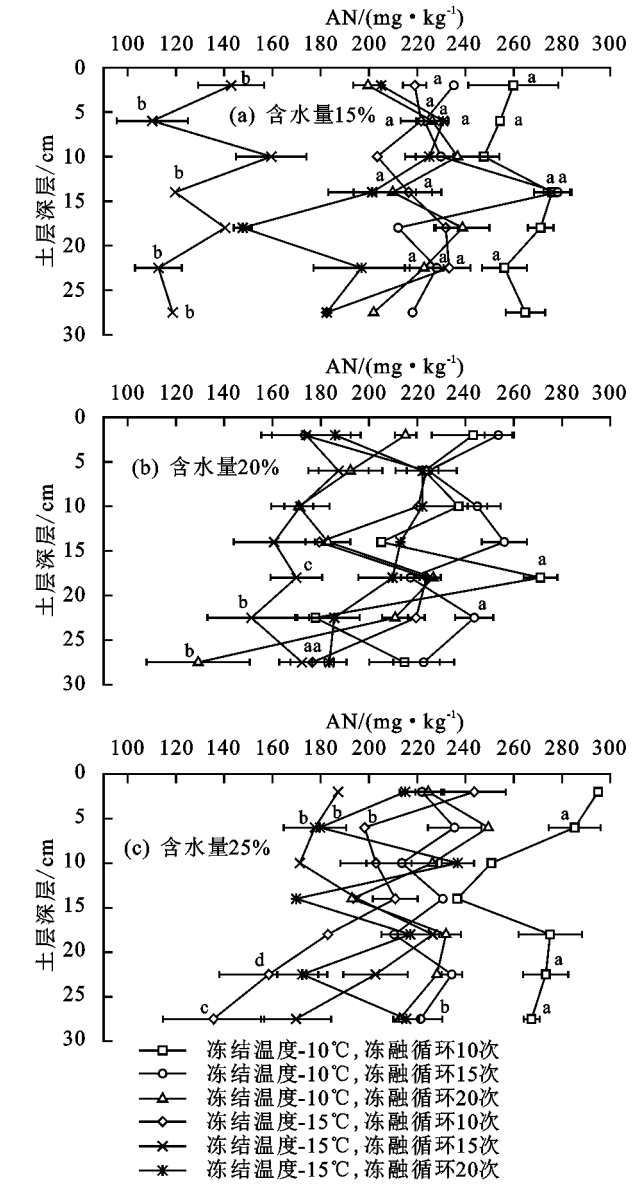
2.2 冻融循环后不同容重土壤剖面 AN 分布特征

在冻结温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)相同情况下,各含水量处理,2 种容重土壤 AN 含量均随土层深度增加呈现“单峰”“双峰”变化趋势,整体上 2 种容重土壤 AN 含量均呈现下降趋势(图 4);容重为 1.0 g/cm^3 土壤中 AN 含量最高值出现在 12—20 cm 土层,而容重为 1.1 g/cm^3 土壤中 AN 含量的最高值出现在 4—20 cm 土层。

容重越高,AN 峰值、AN 土柱平均值越低,表层 0—4 cm 与 4—8 cm 差距越大。当含水量为 15%,土壤容重 1.1 g/cm^3 时 AN 峰值(201.0 mg/kg)比 1.0 g/cm^3 (275.9 mg/kg)降低 27.1%,土壤容重 1.1 g/cm^3 时 AN 平均值(212.5 mg/kg)比 1.0 g/cm^3 (256.1 mg/kg)降低 17.2%($p<0.05$)。

冻结温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)相同,各含水量处理,2 种容重

土层 AN 差值均随土层深度增加呈现“单峰”“双峰”变化趋势,整体上 2 种容重土层 AN 差异均呈现下降趋势(图 5)。2 种容重在 12—16 cm 处、含水量 15%时差异最大,容重 1.1 g/cm^3 时 AN 含量(183.0 mg/kg)比容重 1.0 g/cm^3 (254.6 mg/kg)降低 28.1%。



注:相同土层不同小写字母表示不同冻结温度下 AN 差异显著 ($p<0.05$)。

图 2 土壤容重为 1.0 g/cm^3 不同冻结温度土壤剖面 AN 分布

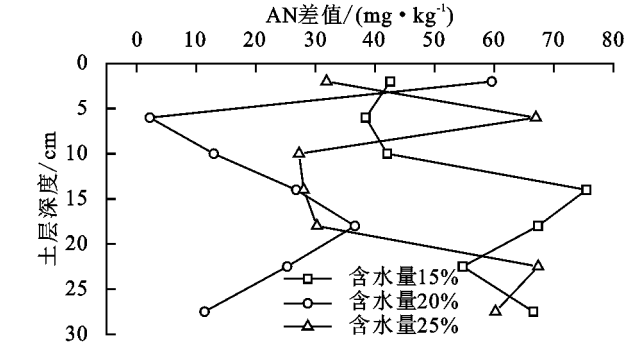
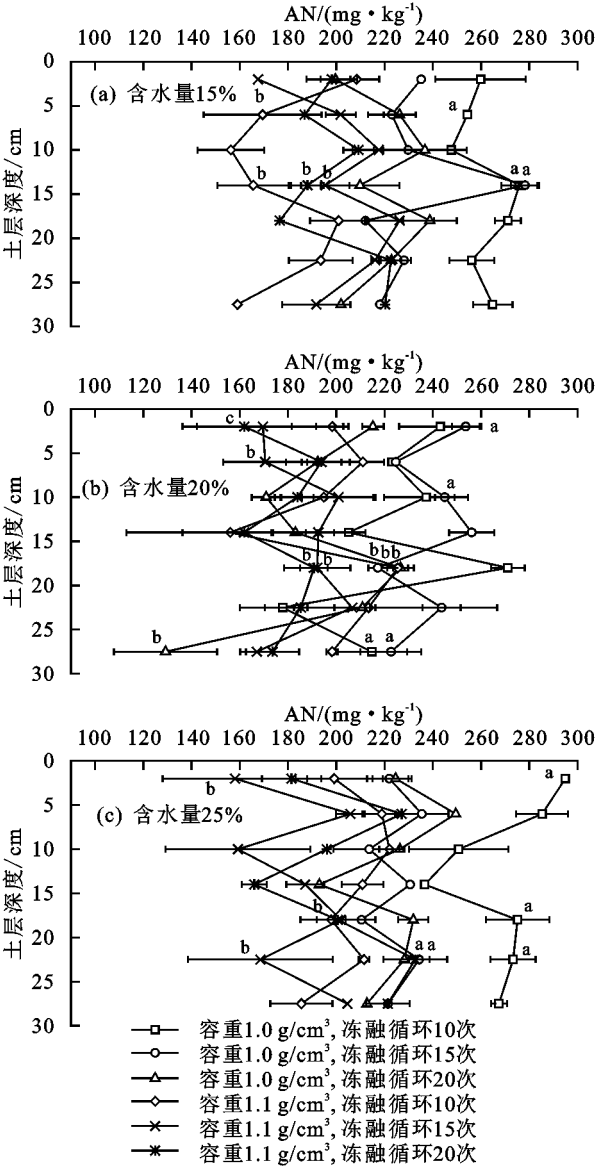


图 3 土壤容重为 1.0 g/cm^3 不同冻结温度土壤剖面 AN 差值分布



注：相同土层不同小写字母表示不同容重下 AN 差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 冻结温度为 -10 °C 不同容重土壤剖面 AN 分布

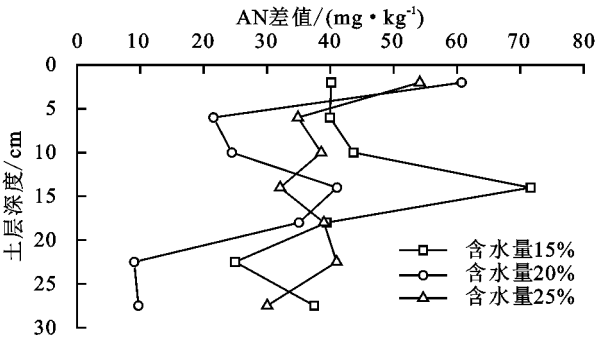


图 5 冻结温度为 -10 °C 不同容重土壤剖面 AN 差值分布

2.3 冻融循环后不同含水量土壤剖面 AN 分布特征

冻融循环试验发现,土壤容重(1.0 g/cm³)相同,随着含水量的提高,表层(0—8 cm)AN 含量越高,底层(20—30 cm)AN 含量越低;表层(0—8 cm)与底层(20—30 cm)中 AN 含量的差异增大,冻结温度降低,差异进一步增大。当含水量为 25%、冻结温度—

10 °C、冻融循环 10 天时 0—8 cm AN(230.1 mg/kg)相比 20—30 cm AN(138.0 mg/kg)提高 66.7%。

冻结温度(-10 °C)相同,随着含水量的提高,不同容重 AN 含量先降低后升高;且含水量越高、容重越大,表层 0—4 cm AN 越低,与 4—8 cm AN 差距越大。当含水量为 25%、容重 1.0 g/cm³ 时 4—8 cm AN(205.8 mg/kg)相比 0—4 cm AN(158.0 mg/kg)提升 30.3%。

2.4 冻融循环后不同容重土壤剖面 AN/TN 分布特征

土壤含水量为 15% 时,土壤容重为 1.0, 1.1 g/cm³ 处理,各冻融循环次数,AN/TN 均呈现“双峰”趋势(表 2),并且在土层深度为 12—16 cm 处均出现了最低值。但随着土层深度增加,2 种容重 AN/TN 差异在 4—8 cm 处达到最大;在冻融循环 20 次、25—30 cm 土层容重 1.1 g/cm³ 的 AN/TN 值(65.8%)比容重 1.0 g/cm³ (4.6%)显著提升 13.3 倍($p < 0.05$)。容重 1.1 g/cm³ 整个土柱 AN/TN 平均值(43.0%)比容重 1.0 g/cm³ (7.5%)提升 4.7 倍。

土壤含水量为 20%,土壤容重为 1.0, 1.1 g/cm³ 时,除容重 1.1 g/cm³、冻融循环 20 次,AN/TN 数值随土层变化的分布曲线均呈“双峰”曲线,并且在土层深度为 12—16 cm 处均出现最低值(表 3)。但随着土层深度增加,AN/TN 值在 25—30 cm 差异最大;且在冻融循环 10 次时,20—25 cm 土层容重 1.1 g/cm³ 的 AN/TN 值(97.0%)比容重 1.0 g/cm³ (4.0%)显著提升 23.3 倍($p < 0.05$);容重 1.1 g/cm³ 整个土柱 AN/TN 平均值(52.3%)比容重 1.0 g/cm³ (32.1%)提升 0.6 倍。

土壤含水量为 25%,土壤容重为 1.0, 1.1 g/cm³ 时,除容重 1.1 g/cm³、冻融循环 20 次,AN/TN 数值随土层变化的分布均呈“双峰”曲线,并且在土层深度为 25—30 cm 处均出现最低值(表 4)。随着土层深度增加,AN/TN 在 20—25 cm 差异最大;在冻融循环 20 次时 20—25 cm 容重 1.1 g/cm³ 的 AN/TN(84.6%)比容重 1.0 g/cm³ 的 AN/TN(8.6%)显著提升 8.8 倍($p < 0.05$);容重 1.1 g/cm³ 的整个土柱 AN/TN 平均值(40.9%)比容重 1.0 g/cm³ (12.7%)提升 2.2 倍。

综合来看,在冻结温度 -10 °C 情况下,2 种容重土柱均随土层深度增加 AN/TN 呈现“单峰”“双峰”变化曲线;2 种容重土壤随着土层深度的增加 AN/TN 差异整体呈现下降趋势;含水量为 15% 的 2 种容重 AN/TN 差异最大,AN/TN 最高差异均出现在 4—8 cm 处。

在冻结温度 -10 °C 情况下,对照组与恒温组 AN/TN 相比,冻融组除容重 1.1 g/cm³、含水量 20%,其余均呈升高趋势;当含水量为 20%、冻结 15 次时,对照组与恒温组 AN/TN(69.6%)相比,冻融组 AN/TN(9.8%)提升 6.1 倍(图 6)。

表 2 冻结温度-10~5℃、土壤含水量 15%条件下不同容重、冻融循环次数土壤剖面 AN/TN 变化

土层深度/cm	容重 1.0 g/cm ³			容重 1.1 g/cm ³		
	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环
	10 次/%	15 次/%	20 次/%	10 次/%	15 次/%	20 次/%
0—4	5.8B	7.7B	8.7B	49.3AB	67.8A	46.7AB
4—8	5.9B	7.1B	5.2B	32.5AB	75.3A	54.0AB
8—12	5.6	5.3	5.2	37.9	51.6	34.8
12—16	6.4	20.6	4.9	30.8	22.8	25.5
16—20	6.2	24.1	5.5	46.9	69.4	12.7
20—25	5.8	8.5	5.2	40.1	24.9	56.4
25—30	5.4B	4.8B	4.6B	46.8AB	10.7B	65.8

注:同行不同大写字母表示不同容重、不同冻融循环次数 AN/TN 差异显著($p<0.05$)。

表 3 冻结温度-10℃、土壤含水量 20%条件下不同容重、冻融循环次数土壤剖面 AN/TN 变化

土层深度/cm	容重 1.0 g/cm ³			容重 1.1 g/cm ³		
	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环
	10 次/%	15 次/%	20 次/%	10 次/%	15 次/%	20 次/%
0—4	30.6	13.8	97.0a	91.0	97.0	34.0
4—8	6.4	90.0	54.2ab	32.3	39.9	39.5
8—12	60.1	37.0	67.6ab	61.3	55.7	27.5
12—16	4.7C	14.6BC	34.1BCb	42.9B	83.9A	13.9BC
16—20	6.2C	35.3BC	23.3BCb	95.9A	63.6AB	6.9BC
20—25	4.0	33.6	32.4b	97.0	78.2	4.2
25—30	5.4B	18.2AB	5.8Bb	93.0A	26.5AB	14.4B

注:同行不同大写字母表示不同容重、不同冻融循环次数 AN/TN 差异显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示不同土层 AN/TN 差异显著($p<0.05$)。下同。

表 4 冻结温度-10℃、土壤含水量 25%条件下不同容重、冻融循环次数土壤剖面 AN/TN 变化

土层深度/cm	容重 1.0 g/cm ³			容重 1.1 g/cm ³		
	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环	冻融循环
	10 次/%	15 次/%	20 次/%	10 次/%	15 次/%	20 次/%
0—4	10.2B	6.8Bab	12.1AB	41.1AB	4.7B	64.3A
4—8	6.6B	11.2Bab	19.2AB	68.2A	5.3B	34.7AB
8—12	11.7BC	12.9BCa	15.6ABC	58.5A	4.6C	48.3AB
12—16	6.8B	6.6Bab	7.0B	40.6A	20.2AB	12.5B
16—20	38.8AB	5.9Bab	8.4B	39.0AB	22.0AB	82.4A
20—25	23.5AB	6.1Bab	8.6B	73.5A	6.4B	84.6A
25—30	18.5B	5.1Bb	24.8B	49.4AB	5.2B	94.2A

在含水量增加的情况下,2 种容重的 0—30 cm 土层 AN/TN 平均值随着冻融循环次数的增加均由“单峰”变化趋势逐渐变为“单谷”变化趋势,在容重为 1.1 g/cm³、含水量 25%时,冻融循环 10 次 AN/TN 平均值(52.9%)是 15 次(9.8%)的 4.4 倍。在冻融循环次数增加的情况下,容重 1.0 g/cm³的 0—30 cm 土层 AN/TN 平均值随着含水量的增加均呈现“单谷”变化趋势;而容重 1.1 g/cm³的 0—30 cm 土层 AN/TN 平均值随着含水量的增加曲线由“单峰”变化趋势变为“单谷”变化趋势;在容重为 1.0 g/cm³、冻融循环 20 次时,含水量 20% AN/TN 平均值(44.9%)是含水量 15%(5.6%)的 7.0 倍。

2.5 冻融循环后 0—30 cm 土层 AN 整体随冻融循环次数增加的变化特征

在不同容重、不同含水量、不同循环天数下,冻融

组和恒温组 AN 含量的高低并不完全一致(表 5)。冻结和恒温次数为 20 次时冻结组与恒温组具有显著性差异的组数最多,在容重 1.0 g/cm³、冻结温度-15℃情况下,冻融组 AN(202.0 mg/kg)相比恒温组 AN(158.4 mg/kg)显著升高 27.5%($p<0.05$)。

容重 1.0 g/cm³、冻结温度-10℃情况下,含水量 15%时,冻融循环 20 次 AN 数值(219.0 mg/kg)相比 10 次(261.3 mg/kg)显著降低 16.2%($p<0.05$)。在容重 1.1 g/cm³、冻结温度-10℃情况下,不同含水量之间的 AN 数值之间不具有显著性差异。在容重 1.0 g/cm³、冻结温度-15℃、含水量 15%情况下,冻融循环 15 次 AN 含量(215.0 mg/kg)比 10 次(128.2 mg/kg)显著降低 40.3%($p<0.05$)。

冻融循环后 0—30 cm 土层,不同冻结温度 0—30 cm 土层 AN 均随着冻融循环次数增加呈先快速降低,

后缓慢降低或升高的变化趋势;不同容重 0—30 cm 土层 AN 均随冻融循环次数的增加均呈先降低后升高的变化趋势;而不同含水量处理,0—30 cm 土层 AN 随冻

融循环次数的增加仍然呈先迅速降低后缓慢降低或增加趋势,其中 15%和 25%初始含水量的土层 AN 均随着冻融循环次数增加呈先下降后上升的变化趋势。

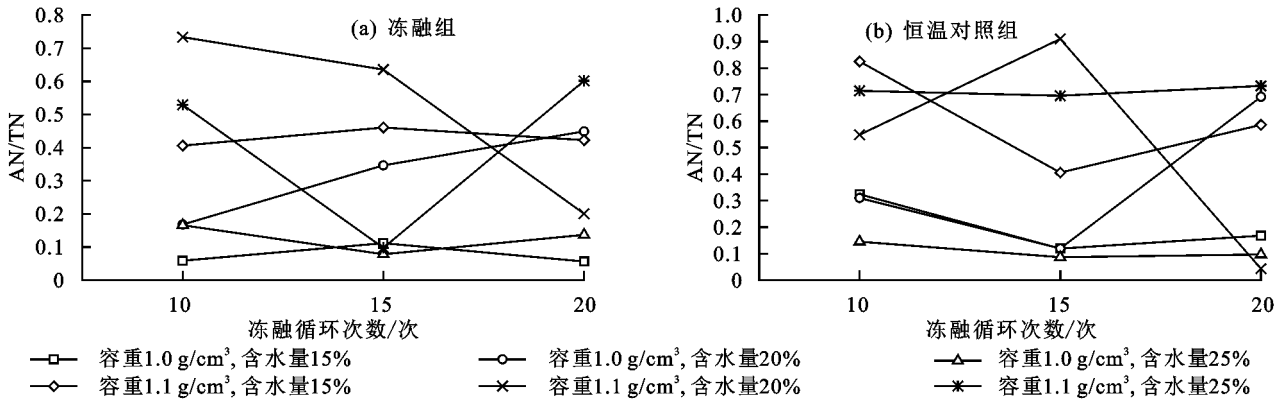


图 6 2 种容重土壤剖面 AN 差值分布

表 5 不同试验条件土壤 AN 含量平均值及标准误差

含水量/%	冻结或恒温 次数/次	容重 1.0 g/cm ³ , 冻结温度-10 ℃		容重 1.1 g/cm ³ , 冻结温度-10 ℃		容重 1.0 g/cm ³ , 冻结温度-15 ℃	
		冻融平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)	恒温平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)	冻融平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)	恒温平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)	冻融平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)	恒温平均值± 标准差/ (mg·kg ⁻¹)
15	10	261.3±12.4Aab	246.4±2.1AB	178.8±11.3D	169.4±8.8D	215.0±10.8Ca	239.1±17.3BC
	15	231.5±11.2Aabc	242.8±7.6A	202.4±12.5B	209.9±0.1B	128.2±6.4Cc	191.7±5.6B
	20	219.0±10.0Acd	212.4±4.8AB	198.3±16.2AB	192.7±0.6B	197.9±12.2Bab	161.4±7.7C
20	10	222.7±9.3ABCbcd	247.7±13.4AB	200.0±13.8C	247.6±5.3A	202.1±12.7BCab	202.6±20.5C
	15	237.3±11.4Aabc	218.0±9.3AB	185.7±11.3CD	202.3±5.3BC	169.0±6.8Db	114.7±9.6E
	20	188.4±13.5BCd	219.1±0.5A	178.7±9.9BCD	164.2±14.6CD	202.0±5.9ABab	158.4±6.5D
25	10	269.2±14.9Aa	260.7±23.6AB	206.0±8.6BC	194.5±6.1C	187.5±8.8Cab	231.0±12ABC
	15	224.3±12.1ABbed	234.9±20.6A	183.8±12.7CD	179.3±11.4D	189.7±11.0CDab	210.1±1.2BC
	20	223.5±11.5Abed	245.7±22A	205.1±18.0AB	178.9±4.4B	200.4±12.6ABab	214.0±16.5AB

注:同行不同大写字母表示不同容重、不同冻结温度、冻融组与恒温组 AN 差异显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示不同含水量、不同冻结或恒温次数 AN 差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

冻融循环过程中土壤水分和溶质存在“二次迁移”的现象,冻结过程表土层孔隙减小,融化过程表土层水分蒸发,均会导致表土层水势降低,促使水分从下向上迁移,容重适当的条件下水分将协同养分向上迁移^[2,9]。一般来说,土壤含水量越高,冻融温度差异越大,对土壤结构的破坏力越强,对冻融交替的抵抗力越弱,AN 由下向上迁移的越多,AN 随土层深度增加变化的波动性越大^[5]。然而也有研究^[10]发现,当表层土壤水分含量较高时,表土层水分从上向下的结晶过程迫使水分和溶质向下迁移。因此,冻融过程中土壤水分和水溶态 N 既可能向上迁移,也可能向下迁移。同时冻融过程也影响到土壤 N 的转化过程,通常冻融循环使有机氮向无机氮的转化,增加 N 的有效性。本研究结果表明,冻融过程整体增加表土层 N 的有效性,冻融后各土层 AN 随土层深度增加呈现波动性下降,且含水量越高,表层(0—8 cm)与底层(20—30 cm)AN 含量的差异越大。本研究团

队的另一项研究^[11]发现,冻融过程通常降低表土层 TN 的含量,因此,推断 N 的转化和运移过程共同导致冻融后表土层 AN 相对增加。以上研究充分证明,冻融过程通常降低土壤 AN 含量,水分对土壤 AN 剖面的影响比较复杂,除影响冻融过程 N 迁移外,还是影响冻融过程土壤 N 有效性的主要因素。

在不同的冻融格局中,冻结温度是影响土壤 N 循环的重要因素。有研究^[12-14]表明,在一定冻融温度范围内,冻融过程加速土壤 N 的矿化速度,增加土壤无机 N 的含量,改变土壤微生物结构,导致土壤 N₂O 的排放增加。但是也有研究^[15]发现,冻融过程没有改变土壤矿化过程和土壤无机 N 的含量,增加土壤对 NH₄⁺—N 的吸附,进而减少 N 的迁移和流失。沼泽土壤中,冻结温度为-25 ℃时 N 的矿化作用显著强于冻结温度为-5 ℃的处理;森林土壤中,冻结温度为-10 ℃处理下的 N₂O 排放量明显高于-5 ℃处理^[16-17]。也有研究^[18]表明,冻结温度为-25 ℃土柱淋出液中 NH₄⁺—N 的浓度相比-15 ℃低,即温

度太低会抑制 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的释放。本研究发现, 冻结温度 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时整个土柱 AN 平均值相比 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 降低 $9.3\% \sim 44.6\%$, 验证了冻融过程温度对土壤 N 形态的重要影响; 同时本研究结果还发现, 在一定冻结温度范围内, 冻结温度越低, AN 越低。

容重是影响冻融过程水分运移的主要因素之一, 通常随着容重的增加土壤水分迁移能力先增加后降低^[6]。本研究发现, 土壤容重较低 (1.0 g/cm^3) 时, 随着土壤含水量的增加, 表层土壤 ($0-8\text{ cm}$) AN 含量相对升高。相关研究^[19]发现, 冻融交替后土壤释放 N_2O 主要来自 $0-5\text{ cm}$ 表土, 高容重土壤的冻土效应强于低容重土壤, 且随着含水量提升, 土壤反硝化作用越强烈, 冻土效应越明显。因此, 本研究中, 土壤容重较高 (1.1 g/cm^3) 时, 随着含水量的提高, 表层土壤 N 的排放增加, 导致 $0-4\text{ cm}$ AN 含量降低幅度较大, 相反在 $4-8\text{ cm}$ 处同时受 N 向上迁移和转化的影响而升高。同时, 当容重增加时, 土壤有效水分减少, 无效水分增大, 同样导致溶于水的有效养分减少, 这也可能是土壤容重较大时表层土壤 AN 含量降低较多的原因之一^[20]。有研究^[16]发现, 低容重土壤 TN 平均含量随冻融循环天数变化流失加剧, 冻融循环在第 15 天时 TN 流失便达到峰值, TN 减少幅度达 52% 。本研究发现, 随冻融循环次数增加, 低容重 (1.0 g/cm^3) 土壤 AN 降低幅度不超过 14.2% , 而高容重 (1.1 g/cm^3) 表土的 AN 含量迅速降低, 降低幅度最高达 19.2% 。因此冻融循环后, 容重越高, 表层黑土 AN 减少越多。

有研究^[21-22]表明, 冻融除了改变土壤结构外, 也改变了剖面土壤微生物的活性, 进而可能改变土壤 N 的形态和运移过程, 频繁的冻融循环导致部分土壤微生物死亡、细胞破裂, 并释放单糖和自由氨基酸等物质, 从而增加土壤速效养分含量; 同时, 冻结条件下存活下来的微生物借助死亡的微生物释放出的养分作为营养基质, 提高土壤中有机质的矿化与硝化速率, 从而增加土壤 AN 的含量。已有研究^[23]表明, 东北黑土区土壤水溶性 N 含量随着冻融循环次数的增加先逐渐增加, 而后达到稳定。本研究中, 不同处理下 AN 变化复杂, 这主要是由于 AN 本身的不稳定性所导致, 其除了易受土壤含水量、温度、容重的变化而改变外, 还受其他很多不确定性因素的影响。因此在不同冻结温度、不同容重、不同含水量、不同冻融循环次数下, 冻融组和恒温组 AN 含量的高低并不完全一致。

本研究中的 AN (碱解氮) 包括无机态氮及易水解的有机态氮, TDS 为水中的溶解物, 通常水中溶解物越多, 有机物越丰富, 抑制 AN 的水解能力越强, 使得土壤中的 AN 保持在较高水平的范围内^[24]。土壤

pH 可以通过改变土壤理化性质, 如养分有效性、阳离子金属溶解度、有机碳特性、土壤水分状况和电导率, 影响 AN 的含量。一定 AN 浓度范围内, 土壤溶液电导率与土壤 AN 含量呈正相关, 溶液电导率越高, 溶液水溶态离子越多, AN 水解能力越高^[9], 因此通过研究土壤电导率变化可以反映 AN 的变化。

为了进一步明确各因素对冻融过程 $0-30\text{ cm}$ 土层 AN 含量的影响, 研究进行了主成分分析和径向基神经网络分析。主成分分析结果表明, 冻融处理后的土壤样品 AN 含量与未经处理的样品明显不同, 分离效应明显, 共解释了土壤性质总变异的 44.9% (图 7)。3 组数据呈现“容重 1.0 g/cm^3 、冻结温度 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ”与“容重 1.1 g/cm^3 、冻结温度 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ”相近, 而容重 1.0 g/cm^3 、冻结温度 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 与前两者相差较大的现象。这说明容重和冻结温度相比, 冻结温度是影响剖面 AN 变化的主要因素 ($p < 0.05$)。主成分分析发现, 变量明显区分成第 1 主成分及第 2 主成分, 是否冻融循环发生和冻融循环次数相关性较强, 二者主要对第 1 主成分起负相关作用; 是否恒温条件和恒温天数相关性较强, 二者主要对第 1 主成分起正向贡献。由此得出, 冻融循环在很大程度上减少 AN 的含量。冻结温度、pH 等变量对第 1 主成分的解释几乎为 0, 而在第 2 主成分的解释中占主要部分。除 pH 大小对 AN 积累呈负相关外, 含水量、TDS、电导率、冻结温度与 AN 含量呈正相关。

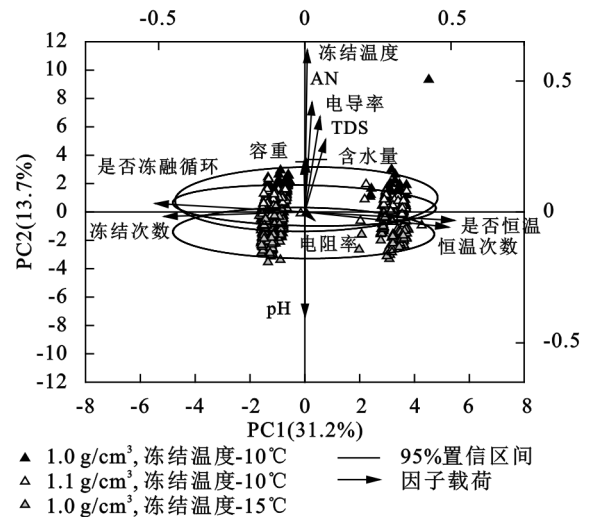


图 7 AN 主成分分析

影响 AN 的随机因素众多, 采取径向基神经网络可以观察自变量对土壤 AN 含量变化的影响权重。与主成分分析不同, 径向基神经网络中的自变量重要性把各个变量分为因子 (外界影响因素) 和协变量 (独立变量, 不为试验者所操纵, 但仍影响试验结果), 可用来解释各个因子、变量对于 AN 含量变化的影响程度^[25]。本研究中输入层中的因子包含冻融循环次数、是否冻融循环、容重、恒温次数、含水量、冻结温度,

协变量包括 pH、电导率、TDS、电阻率(表 6)。土壤 AN 含量变化的影响因子呈现是否冻融循环>恒温次数>冻融循环次数>冻结温度>含水量>容重,协变量呈现 pH>TDS>电阻率>电导率($p<0.05$)。

表 6 影响冻融过程 AN 的变量相对重要性分布

变量	重要值	标准化的重要性/%
pH	0.206	100.0
TDS	0.183	88.7
电阻率	0.174	84.2
是否冻融循环	0.143	69.2
恒温次数	0.125	60.8
冻融循环次数	0.092	44.4
电导率	0.034	16.3
冻结温度	0.033	16.0
含水量	0.007	3.2
容重	0.003	1.6

因此,综上所述,“是否进行冻融循环”显著影响土壤 AN 的含量和剖面分布特征,进而影响土壤 N 的有效性和流失风险。因此东北黑土区冻融循环过程土壤 N 的管理十分重要,采用恰当的管理方式,调整土壤容重、土壤水分、植被地表覆盖等方式调控冻融过程 N 的有效性和流失,对于保持土壤肥力、保护生态环境质量和促进区域农业的可持续性有重要意义。

4 结论

- (1)经冻融循环后,土壤 AN 含量随土层深度增加呈现波动性下降的趋势;
- (2)冻结温度降低,AN 随土层深度增加下降的波动性增加,整个土柱 AN 含量降低;
- (3)随着含水量的提高,低容重(1.0 g/cm³)表层(0—8 cm)AN 越高,底层(20—30 cm)AN 越低;而高容重(1.1 g/cm³)土柱表层(4—8 cm)AN 越高,表层(0—4 cm)AN、底层(20—30 cm)AN 越低,
- (4)冻融循环后,高容重(1.1 g/cm³)的土柱具有相对较低的 AN 含量和高的 AN/TN 值;
- (5)pH 大小与 AN 积累趋势呈负相关关系,含水量、TDS、电导率、冻结温度与 AN 含量成正相关关系。是否冻融循环对 AN 垂直分布影响最大,其次是恒温及冻融循环次数。

参考文献:

[1] Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review[J].Pedosphere,2016,26(2):167-179.

[2] 彭振阳,黄介生,曾文治,等.季节性冻融土壤水分运动规律[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(6):696-700.

[3] 王风,高尚宾,白丽静,等.冻融过程不同粒径土壤 N₂O 排放特征[J].应用与环境生物学报,2010,16(1):126-128.

[4] 任伊滨,任南琪,李志强.冻融对小兴安岭湿地土壤微生物碳、氮和氮转换的影响[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(4):530-535.

[5] Shen Q S, Wang X S, Qu F J, et al. Responses of soil total phosphorus to freeze and thaw cycles in a Mollisol watershed[J].Geoderma,2020,376:114571.

[6] 张少良,沈庆松,王曜,等.不同冻结强度下容重和含水量对黑土剖面水分变化特征影响[J].东北农业大学学报,2016,47(12):48-55.

[7] Zhang S L, Huang J, Wang Y, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil available nitrogen during crop growth stages on mollisol slopes of Northeast China: Spatio-temporal heterogeneity of soil available nitrogen [J].Land Degradation and Development,2017,28(3):856-869.

[8] Han Z M, Deng M W, Yuan A Q, et al. Vertical variation of a black soil's properties in response to freeze-thaw cycles and its links to shift of microbial community structure[J].Science of the Total Environment,2018,625:106-113.

[9] Bing H, He P. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil[J]. Environmental Earth Sciences,2011,64:431-436.

[10] Bing H, He P, Zhang Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J].Environmental Earth Sciences,2015,74:675-681.

[11] 王曜.冻融驱动下东北黑土小流域耕层氮时空分异特征研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.

[12] Fuss C B, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Nitrate and dissolved organic carbon mobilization in response to soil freezing variability[J].Biogeochemistry,2016,131:35-47.

[13] Wang R, Zhu Q K, Ma H, et al. Spatial-temporal variations in near-surface soil freeze-thaw cycles in the source region of the Yellow River during the period 2002—2011 based on the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) data [J].Journal of Arid Land,2017,9:850-864.

[14] Sanders-DeMott R, Sorensen P O, Reinmann A B, et al. Growing season warming and winter freeze-thaw cycles reduce root nitrogen uptake capacity and increase soil solution nitrogen in a northern forest ecosystem [J].Biogeochemistry,2018,137(3):337-349.

[15] 陈奕汀,程红光,蒲晓,等.冻融作用对旱地土壤中不同吸附形态铵根离子的影响[J].安徽农业科学,2012,40(19):10094-10097.

[16] 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.