

冻融作用对农田黑土有机氮组分的调控效应^①

隽英华¹, 田路路², 刘 艳¹, 宫 亮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, 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土壤有机氮库组成及转化特征, 采用 Bremner 氮素分级法研究了室内模拟冻融条件下(冻融温度、冻融频数、水分含量)农田黑土有机氮组分含量的变化行为。结果表明: 冻融作用对农田黑土有机氮组分及其转化过程影响显著, 氨态氮和氨基酸氮是土壤酸解有机氮的主要组分。随着冻结温度降低, 土壤氨基酸氮含量显著增加, 氨态氮和未知氮含量均显著降低, 而氨基糖氮含量变化行为因融化温度而异。随着融化温度升高, 土壤酸解有机氮组分无规律性变化。随着冻融频数增加, 冻融土壤氨基酸氮含量显著降低, 未知氮含量显著增加, 氨态氮含量先增加后降低, 而氨基糖氮含量则无显著性变化。随着水分含量增加, 冻融土壤氨态氮和未知氮含量均显著增加, 这与氨基酸氮的变化趋势正好相反, 而氨基糖氮含量则无显著性变化。可见, 较大的冻融温差、适宜的冻融频数和水分含量是影响土壤有机氮库转化的主要驱动因子。冻融作用能够提高土壤酸解有机氮中氨态氮和氨基酸氮的含量及其分配比例, 增加土壤可矿化氮量, 促进土壤氮素转化, 有利于土壤有效氮的累积, 为春季作物生长提供足够的氮素。

关键词: 冻融作用; 农田黑土; 氮素转化; 有机氮组分

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Regulation Effects of Freezing-Thawing Cycles on Farmland Black Soil Organic Nitrogen Components

JUAN Yinghua¹, TIAN Lulu², LIU Yan¹, GONG Liang¹, SUN Wentao^{1*}

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

Abstract: In order to deeply understand organic nitrogen (N) components and transformation properties of farmland soil during non-growing season, with a laboratory simulation experiment, the dynamics of organic N components in the cultivated black soil were investigated under different freezing-thawing conditions (freezing-thawing temperature, freezing-thawing frequency, water content) by the Bremner N classification method. The results showed that freezing-thawing cycles (FTCs) had significant influence on organic N fractions and transformation process of cultivated black soil, and ammonia N and amino acid N were the main components of soil acid-hydlyzable organic N. With freezing temperature decreasing, amino acid N content significantly increased, ammonia N and unknown N contents significantly decreased, and the changes of amino sugar N content differed from thawing temperature. With thawing temperature increasing, the fractions of acid-hydlyzable organic N changed with no rule. With freezing-thawing frequency increasing, amino acid N content significantly decreased, unknown N content significantly increased, ammonia N content first increased then decreased, and amino sugar N content changed with no significance. With water content increasing, the contents of ammonia N and unknown N in the FTCs-treated soil both increased significantly being contrary to the changes of amino acid N, and amino sugar N content changed with no significance. Therefore, it is preliminarily concluded that larger freezing-thawing amplitude, suitable freezing-thawing frequency and water content were the major factors affecting organic N transformation of farmland black soil. FTCs could enhance the contents and proportions of ammonia N and

①基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807221)、公益性行业(农业)科研专项(201503118-08)、国家重点研发计划项目(2017YFD0300702, 2018YFD0300303)和国家自然科学基金项目(41301253)资助。

* 通讯作者(wentao@163.com)

作者简介: 隽英华 (1979—), 男, 山东莒南人, 博士, 研究员, 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

amino acid N in acid-hydolyzable organic N, increase soil mineralizable N content, promote soil N transformation, and was beneficial to the accumulation of soil available N, which could provide abundant nutrients for crop growth in spring.

Key words: Effect of freezing-thawing; Cultivated black soil; Nitrogen transformation; Organic nitrogen fractions

氮素是植物生长最重要的元素之一,也是全球生态系统物质循环的重要组成部分^[1]。有机态氮是土壤氮素的主要存在形态,也是矿质氮的源和汇^[1-2],在维持土壤氮素平衡和潜在供氮能力方面具有十分重要的作用^[3-4]。因此,关于有机氮组分及其有效性的研究一直是土壤氮素肥力研究的重点^[5]。由于土壤有机氮组分复杂,其研究难度也比较大,自1964年Bremner^[6]提出将有机氮划分为酸解有机氮(氨态氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮、未知氮)和非酸解氮后,学者们才开始对土壤有机氮形态特征及其驱动因子进行了一系列研究^[7-10]。研究表明,土壤有机氮组分含量、形态及其分配比例不仅受种植年限^[11]、耕作方式^[12]、轮作模式^[13]、灌溉^[14]、施肥^[15]等人为管理措施的显著影响,同时也受土壤类型^[7]、区域维度^[5]等自然环境因素的决定性制约。然而,对于土壤有机氮来源及其组分变化的研究大多集中在人为管理措施的影响方面,而对自然环境因素的影响方面鲜有报道。

作为一种自然现象,冻融交替在中高纬度和高海拔地区非常普遍^[16]。冬春季节土壤频繁冻融可明显改变土壤的理化特性和生物学特性,如破坏土壤结构、影响团聚体稳定性、提高养分有效性、增强酶活化效应等^[17-20]。研究表明,冻融作用显著提高土壤可溶性氮组分含量,促进土壤氮素矿化^[20-21]。但也有研究表明,冻融作用对土壤可溶氮含量无正向影响,甚至降低土壤净氮矿化速率^[22-23]。关于冻融作用对土壤氮素转化过程影响研究的争议,其原因可能是冻融期间土壤氮素转化受冻融温差、土壤水分含量、土壤理化性质等多因素的协同制约^[20, 24-25]。

因此,了解不同冻融因子作用下土壤有机氮组分特征及其含量变化行为,对于揭示冻融作用对土壤氮素转化的影响过程意义重大。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农田土壤氮素养分的供应^[20, 26]。鉴于此,以东北典型农田黑土为供试对象,采用室内冻融模拟培养方法研究不同冻融因子(冻融温度、冻融频数、土壤水分含量)对土壤有机氮组分含量的影响行为,以期揭示冻融作用下农田黑土有机氮转化的演变规律,为农田黑土非生长季氮素循环和氮素管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试农田黑土于2013年10月采自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)。该站属中温带半湿润大陆性季风气候,年均温度4~5℃,年均降雨量450~650 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 ℃,年蒸发量1 200~1 600 mm,年日照时间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;土壤类型为中层典型黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物。供试土壤样品采集及处理方法和基础化学性质详见田路路等^[20]。

1.2 冻融试验设计

取定量过筛(≤ 2 mm)后鲜土,用蒸馏水调节含水量至100 g/kg,放入10℃(模拟采样地区10月末至11月初田间原位土壤冻融循环初次发生时的平均气温)的恒温培养箱中预培养15 d,使其恢复生物学活性。预培养期间每天透气并用蒸馏水补充损失的水分。

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平铺于培养瓶(100 ml)的瓶底,用蒸馏水调节含水量至150 g/kg,用带孔的保鲜膜封口,在某一温度下冻结6 d,然后在某一温度下融化1 d,混匀,随机取样进行有机氮组分分析。冻结温度设定为:-15、-12、-9、-6、-3℃;融化温度设定为2、5℃。3次重复,并设置恒温2℃处理作为对照。试验期间每隔2 d称重并用蒸馏水补充损失的水分。

1.2.2 冻融频数模拟试验 称取相当于200 g风干土的预培养土壤平铺于培养瓶(100 ml)的瓶底,用蒸馏水调节含水量至150 g/kg,用带孔的保鲜膜封口,经过一定频数的冻融后,混匀,随机取样进行有机氮组分分析。冻融频数设定为:1、3、6、10、15;其中,1个冻融频数包含在-3℃冻结6 d,然后在2℃融化1 d。3次重复,并设置恒温2℃处理作为对照。试验期间每隔2 d称重并用蒸馏水补充损失的水分。

1.2.3 冻融水分含量模拟试验 称取相当于200 g风干土的预培养土壤平铺于培养瓶(100 ml)的瓶底,通过注射器均匀加蒸馏水调节含水量至100、200和300 g/kg,用带孔的保鲜膜封口,经过1个冻融频数

后(冻融频数设定同 1.2.2), 混匀, 随机取样进行有机氮组分分析。3 次重复, 并设置恒温 2℃ 处理作为对照。试验期间每隔 2 d 称重并用蒸馏水补充损失的水分。

1.3 测定方法

土壤全氮采用凯氏定氮法测定^[27]。有机氮组分采用改良 Bremner 法测定^[9, 27]。另外, 非酸解氮、氨基糖态氮、未知氮均用差减法获得。非酸解氮 = 凯氏全氮 - 酸解有机氮; 氨基糖态氮 = (氨态氮和氨基糖态氮总量 - 氨态氮) × 1.4; 未知氮 = 酸解有机氮 - 氨态氮 - 氨基酸态氮 - 氨基糖态氮。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件分别进行数据处理和方差分析, 采用 Duncan 新复极差法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$); 数值采用平均值 ± 标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对农田黑土全氮、酸解有机氮和酸解率的影响

在不同冻融温度作用下, 农田黑土酸解有机氮含量为 942.45 ~ 998.71 mg/kg, 非酸解氮含量为 773.18 ~ 829.44 mg/kg(表 1)。与对照相比, -9℃冻结 2℃融化、-12℃和-15℃冻结 5℃融化处理土壤酸解有机氮含量显著降低, 非酸解氮含量显著增加。随着冻结温度降低, 2℃融化土壤酸解有机氮含量先降低后增加, 而非酸解氮含量则先增加后降低, 均在-9℃冻结时达到极值, 分别为 946.08 mg/kg 和 825.81 mg/kg; 5℃

融化土壤酸解有机氮含量显著降低, 这与非酸解氮含量的变化趋势正好相反。随着融化温度升高, -15℃冻结土壤酸解有机氮含量均显著降低, 而非酸解氮含量则显著升高。可见, 农田黑土酸解有机氮和非酸解氮含量变化行为受冻结温度和融化温度的双重制约。

在不同冻融频数作用下, 农田黑土酸解有机氮含量为 900.10 ~ 1 067.61 mg/kg, 非酸解氮含量为 704.27 ~ 871.80 mg/kg(表 2)。与对照相比, 频数 10 和频数 15 冻融土壤酸解有机氮含量均显著增加, 而非酸解氮含量则显著降低, 增加幅度分别在 11.64% ~ 15.27% 和 -13.65% ~ -15.77%。随着冻融频数增加, 冻融土壤酸解有机氮含量显著增加, 而非酸解氮含量则显著降低, 均在频数 15 时达到极值, 分别为 1 067.61 mg/kg 和 704.27 mg/kg。

不同水分含量作用下, 冻融农田黑土酸解有机氮含量为 966.87 ~ 996.68 mg/kg, 非酸解氮含量为 775.21 ~ 805.02 mg/kg(表 3)。与对照相比, 水分含量 200 g/kg 和 300 g/kg 冻融土壤酸解有机氮含量均显著降低, 而非酸解氮含量则显著增加, 增加幅度分别在 -6.65% ~ -6.95% 和 9.35% ~ 10.16%。随着水分含量增加, 冻融土壤酸解有机氮和非酸解氮含量均无显著性变化。

在酸解率方面, 随着冻结温度降低, 2℃融化土壤先降低后增加, 在-9℃冻结时达到极小值(53.39%); 5℃融化土壤则显著降低, 在-15℃冻结时达到极小值(53.19%)。随着融化温度升高, -15℃冻

表 1 不同冻融温度作用下农田黑土全氮、酸解有机氮和酸解率

Table 1 Total nitrogen, hydrolyzable nitrogen and acid hydrolysis rate in the cultivated black soil affected by freezing-thawing temperature

冻融温度处理	全氮(mg/kg)	酸解有机氮(mg/kg)	非酸解氮(mg/kg)	酸解率(%)
恒温 2℃ (CK)	1 771.89 ± 71.63 aA	978.89 ± 11.60 abA	793.00 ± 11.60 bcA	55.25 ± 0.65 abA
-3℃冻 2℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	998.71 ± 13.65 aA	773.18 ± 13.65 cA	56.36 ± 0.77 aA
-6℃冻 2℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	967.68 ± 17.84 bcA	804.21 ± 17.84 abA	54.61 ± 1.01 bcA
-9℃冻 2℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	946.08 ± 11.98 cA	825.81 ± 11.98 aA	53.39 ± 0.68 cA
-12℃冻 2℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	967.18 ± 11.00 bcA	804.71 ± 11.00 abA	54.58 ± 0.62 bcA
-15℃冻 2℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	979.11 ± 7.69 abA	792.78 ± 7.69 bcB	55.26 ± 0.43 abA
恒温 2℃ (CK)	1 771.89 ± 71.63 aA	978.89 ± 11.60 abA	793.00 ± 11.60 bcA	55.25 ± 0.65 abA
-3℃冻 5℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	992.10 ± 11.30 abA	779.79 ± 11.30 bcA	55.99 ± 0.64 abA
-6℃冻 5℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	996.38 ± 3.30 aA	775.51 ± 3.30 cA	56.23 ± 0.19 aA
-9℃冻 5℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	974.06 ± 16.47 bA	797.83 ± 16.47 bA	54.97 ± 0.93 bA
-12℃冻 5℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	951.59 ± 0.69 cA	820.30 ± 0.69 aA	53.71 ± 0.04 cA
-15℃冻 5℃融	1 771.89 ± 71.63 aA	942.45 ± 10.76 cB	829.44 ± 10.76 aA	53.19 ± 0.61 cB

注: 表中同列数据小写字母不同代表冻结温度处理间差异显著($P < 0.05$), 表中同列数据大写字母不同代表融化温度处理间差异显著($P < 0.05$)。

表2 不同冻融频数作用下农田黑土全氮、酸解有机氮和酸解率

Table 2 Total nitrogen, hydrolyzable nitrogen and acid hydrolysis rate in the cultivated black soil affected by freezing-thawing frequency

冻融频数处理	全氮(mg/kg)	酸解有机氮(mg/kg)	非酸解氮(mg/kg)	酸解率(%)
CK1	1 771.89 ± 71.63 aA	954.13 ± 7.03 aA	817.76 ± 7.03 bA	53.85 ± 0.40 aA
CK3	1 771.89 ± 71.63 aA	957.23 ± 3.72 aA	814.66 ± 3.72 bA	54.02 ± 0.21 aA
CK6	1 771.89 ± 71.63 aA	951.31 ± 18.45 aA	820.58 ± 18.45 bA	53.69 ± 1.04 aA
CK10	1 771.89 ± 71.63 aA	900.10 ± 23.92 bB	871.80 ± 23.92 aA	50.80 ± 1.35 bB
CK15	1 771.89 ± 71.63 aA	956.37 ± 5.30 aB	815.52 ± 5.30 bA	53.97 ± 0.30 aB
FT1	1 771.89 ± 71.63 aA	982.39 ± 7.57 cA	789.49 ± 7.57 aA	55.44 ± 0.43 cA
FT3	1 771.89 ± 71.63 aA	1 013.06 ± 26.40 bcA	758.82 ± 26.40 abA	57.17 ± 1.49 bcA
FT6	1 771.89 ± 71.63 aA	1 031.75 ± 36.53 abA	740.14 ± 36.53 bcA	58.23 ± 2.06 abA
FT10	1 771.89 ± 71.63 aA	1 037.53 ± 15.75 abA	734.36 ± 15.75 bcB	58.56 ± 0.89 abA
FT15	1 771.89 ± 71.63 aA	1 067.61 ± 14.16 aA	704.27 ± 14.16 cB	60.25 ± 0.80 aA

注: CK_n 和 FT_n 分别代表不同频数的对照和冻融处理; 表中同列数据小写字母不同代表频数处理间差异显著($P<0.05$), 表中同列数据大写字母不同代表冻融与对照处理间差异显著($P<0.05$)。

表3 不同水分含量作用下冻融农田黑土全氮、酸解有机氮和酸解率

Table 3 Total nitrogen, hydrolyzable nitrogen and acid hydrolysis rate in the freezing-thawing cycles (FTCs)-treated cultivated black soil affected by moisture regime

冻融水分处理	全氮(mg/kg)	酸解有机氮(mg/kg)	非酸解氮(mg/kg)	酸解率(%)
CK100	1 771.89 ± 71.63 aA	1 021.76 ± 37.07 aA	750.13 ± 37.07 aA	57.66 ± 2.09 aA
CK200	1 771.89 ± 71.63 aA	1 035.72 ± 4.30 aA	736.18 ± 4.30 aB	58.45 ± 0.24 aA
CK300	1 771.89 ± 71.63 aA	1 052.22 ± 11.31 aA	719.67 ± 11.31 bA	59.38 ± 0.64 aA
FT100	1 771.89 ± 71.63 aA	996.68 ± 0.28 aA	775.21 ± 0.28 aA	56.25 ± 0.02 aA
FT200	1 771.89 ± 71.63 aA	966.87 ± 15.82 aB	805.02 ± 15.82 aA	54.57 ± 0.89 aB
FT300	1 771.89 ± 71.63 aA	979.16 ± 26.94 aB	792.73 ± 26.94 aA	55.26 ± 1.52 aB

注: CK_n 和 FT_n 分别代表不同水分含量的对照和冻融处理; 表中同列数据小写字母不同代表水分处理间差异显著($P<0.05$), 表中同列数据大写字母不同代表冻融与对照处理间差异显著($P<0.05$)。

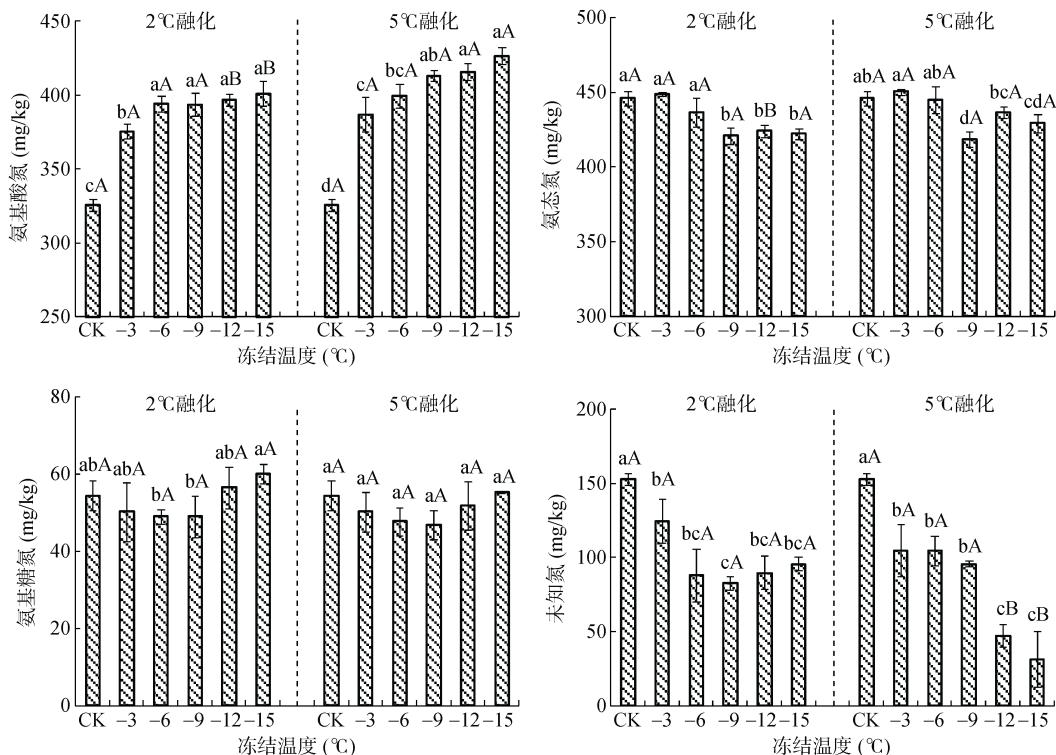
结土壤酸解率显著降低(表1)。与对照相比, 频数10和频数15冻融土壤酸解率均显著增加, 而水分含量200 g/kg和300 g/kg冻融处理则显著降低(表2、表3)。随着冻融频数增加, 冻融土壤酸解率显著增加, 在频数15时达到最大值(60.25%), 较频数1处理增加了8.68%(表2)。随着水分含量增加, 冻融土壤酸解率无显著变化(表3)。

2.2 冻融作用对农田黑土酸解有机氮组分含量的影响

冻融温度对农田黑土酸解有机氮组分影响显著($P<0.05$), 且各组分含量大小顺序为氨态氮>氨基酸氮>未知氮>氨基糖氮(图1)。与对照相比, 冻融农田黑土氨基酸氮含量显著增加, 氨态氮和未知氮含量显著降低, 而氨基糖氮含量则无明显变化。冻融农田黑土酸解有机氮组分含量的变化行为受冻结温度和融化温度的协同影响。随着冻结温度降低, 冻融农田黑土氨基酸氮含量显著增加, 氨态氮和未知氮含量显著降低, 而氨基糖氮含量变化行为因融化温度而异。在2℃融化时, 土壤氨基糖氮含量先保持相对稳定后显

著增加, 而在5℃融化时则无显著性变化。随着融化温度升高, -12℃和-15℃冻结土壤氨基酸氮含量均显著增加, 这与未知氮的变化行为正好相反; -12℃冻结土壤氨态氮含量显著增加, 而氨基糖氮含量则无显著性变化。可见, 冻融温差对冻融农田黑土酸解有机氮组分特征及其含量影响较大, 较大的冻融温差造成了冻融农田黑土氨基酸氮含量增加和未知氮含量降低(图1)。

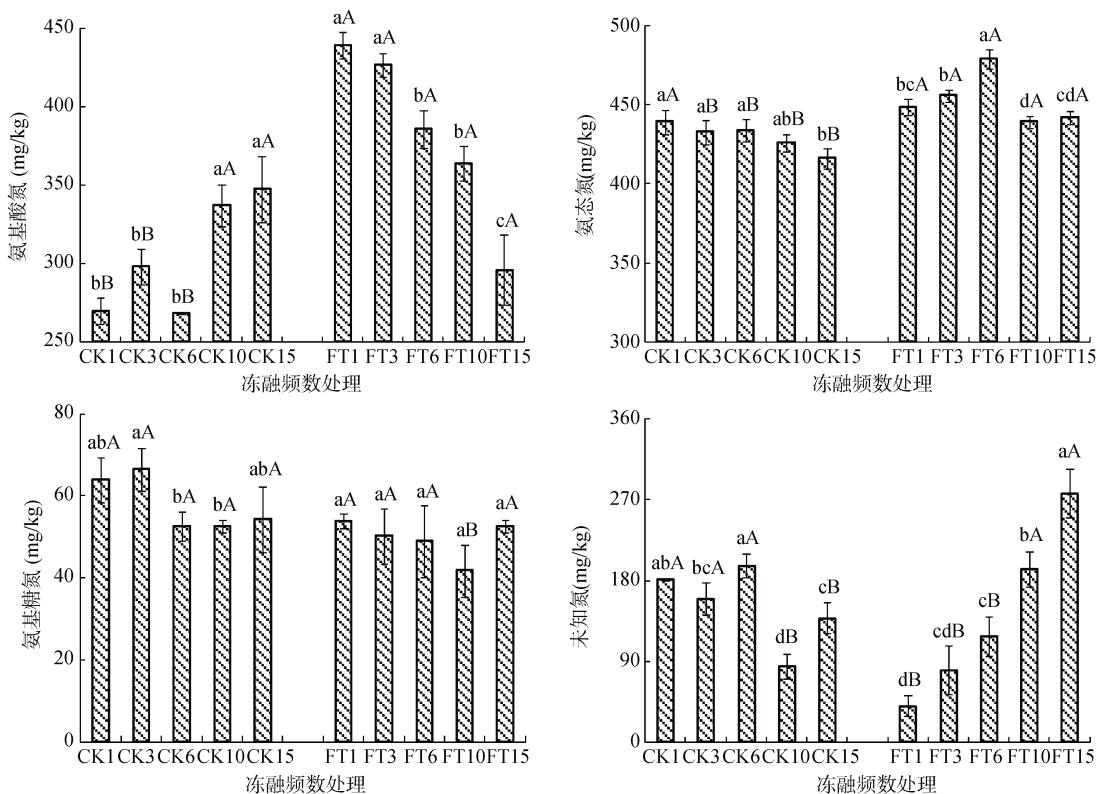
冻融频数对农田黑土酸解有机氮组分影响显著($P<0.05$), 且各组分含量大小顺序为氨态氮>氨基酸氮>未知氮>氨基糖氮(图2)。与对照相比, 冻融土壤氨态氮含量显著增加, 氨基糖氮含量无显著性变化, 而氨基酸氮和未知氮含量的变化行为因冻融频数而异。小频数(1、3、6)冻融能够显著增加氨基酸氮含量和降低未知氮含量, 而大频数(10、15)冻融则显著增加未知氮含量。随着冻融频数增加, 冻融农田黑土氨基酸氮含量显著降低, 未知氮含量显著增加, 氨态氮含量先增加后降低, 而氨基糖氮含量则无规律性变化。可见, 短期冻融循环对农田黑土酸解有机氮组分



(柱图上方不同小写字母表示冻结温度处理间差异达显著水平($P<0.05$)，不同大写字母表示融化温度处理间差异达显著水平($P<0.05$))

图 1 不同冻融温度作用下农田黑土酸解有机氮组分含量

Fig. 1 Contents of fractions of acid-hydrolyzable organic N in the cultivated black soil affected by freezing-thawing temperature



(柱图上方不同小写字母表示不同冻融频数处理间差异达显著水平($P<0.05$)，不同大写字母表示同一频数冻融与对照处理间差异达显著水平($P<0.05$))

图 2 不同冻融频数作用下农田黑土酸解有机氮组分含量

Fig. 2 Contents of fractions of acid-hydrolyzable organic N in the cultivated black soil affected by freezing-thawing frequency

特征的影响程度较大。

水分含量对冻融农田黑土酸解有机氮组分影响显著($P<0.05$)，且各组分含量大小顺序为氨态氮>氨基酸氮>未知氮>氨基糖氮(图3)。与对照相比，冻融土壤氨态氮含量显著增加，而氨基酸氮、氨基糖氮和未知氮含量的变化行为因水分含量而异。随着水分含量增加，对照土壤氨态氮和未知氮含量均显著增加，氨基酸氮含量先降低后增加，而氨基糖氮含量则无显著性变化；冻融土壤氨态氮和未知氮含量均显著增加，这与氨基酸氮含量的变化趋势正好相反，而氨基糖氮含量则无显著性变化。

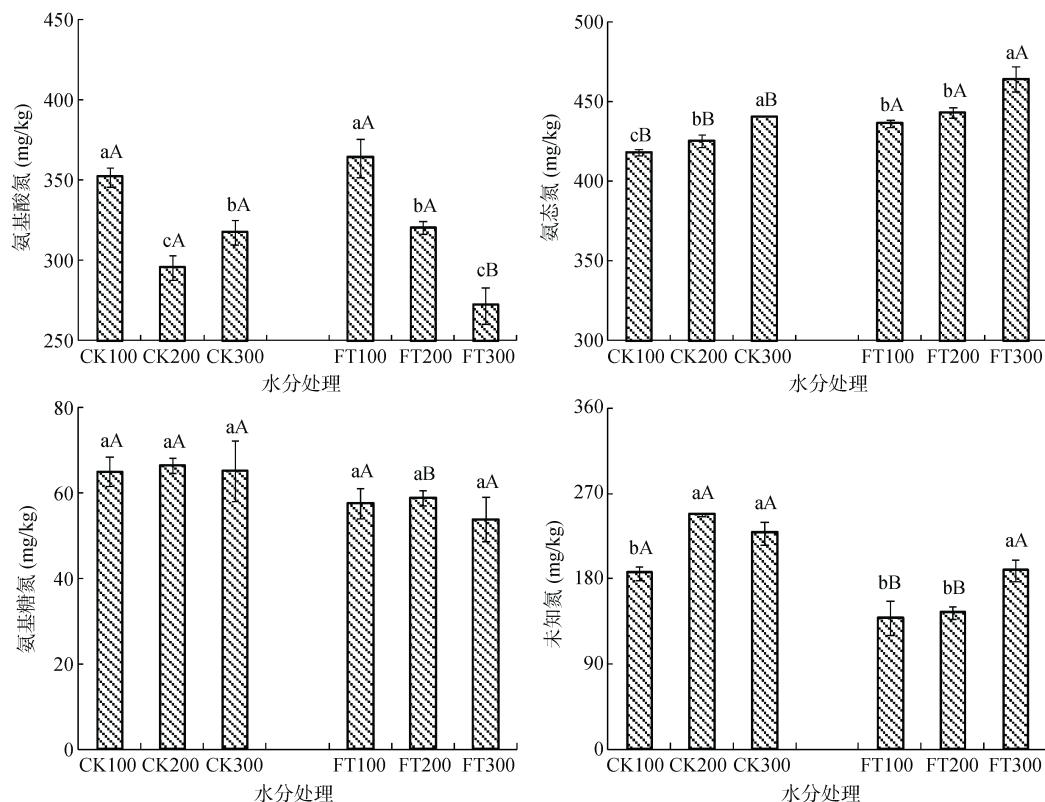
2.3 冻融作用对农田黑土有机氮组分分配比例的影响

不同冻融温度作用下农田黑土未知氮占全氮的比例为1.77%~6.69%，氨态氮占全氮的比例为23.61%~25.41%，氨基酸氮占全氮的比例为21.84%~24.09%，氨基糖氮占全氮的比例为2.64%~3.39%，未酸解氮占全氮的比例为43.64%~46.81%(图4)。随着冻结温度降低，土壤未知氮和氨态氮占全氮的比例均呈降低趋势，氨基酸氮占全氮的比例呈增加趋势，而氨基糖氮和5℃融化条件下未酸解氮占

全氮的比例则先降低后增加，这与2℃融化条件下未酸解氮的变化行为正好相反。随着融化温度升高，有机氮各组分占全氮的比例因受冻结温度的协同影响而无规律性变化。

不同冻融频数作用下农田黑土未知氮占全氮的比例为2.28%~15.64%，氨态氮占全氮的比例为24.78%~27.03%，氨基酸氮占全氮的比例为16.71%~24.81%，氨基糖氮占全氮的比例为2.36%~3.04%，未酸解氮占全氮的比例为39.75%~44.56%(图5)。随着冻融频数增加，冻融土壤氨态氮占全氮的比例先增加后降低，而未知氮占全氮的比例显著增加，这与氨基酸氮、氨基糖氮和未酸解氮的变化行为正好相反。

不同水分含量作用下冻融农田黑土未知氮占全氮的比例为7.81%~10.65%，氨态氮占全氮的比例为24.64%~26.21%，氨基酸氮占全氮的比例为15.35%~20.54%，氨基糖氮占全氮的比例为3.04%~3.33%，未酸解氮占全氮的比例为43.75%~45.43%(图6)。随着水分含量增加，冻融土壤氨基糖氮和未酸解氮占全氮的比例均先增加后降低，而未知氮和氨态氮占全氮的比例则呈增加趋势，这与氨基酸氮的变化行为正好相反。



柱图上方不同小写字母表示不同水分处理间差异达显著水平($P<0.05$)，不同大写字母表示同一水分含量下冻融与对照处理间差异达显著水平($P<0.05$)

图3 不同水分含量作用下冻融农田黑土酸解有机氮组分含量

Fig. 3 Contents of fractions of acid-hydrolyzable organic N in the FTCs-treated cultivated black soil affected by moisture regime

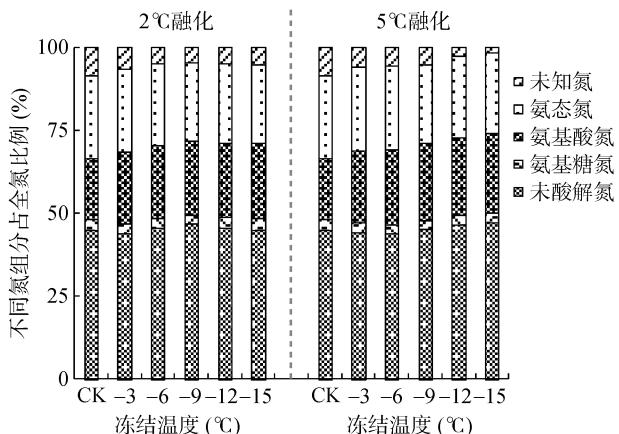


图 4 不同冻融温度作用下农田黑土有机氮组分分配比例

Fig. 4 Proportions of various fractions of organic N to total N in the cultivated black soil affected by freezing-thawing intensity

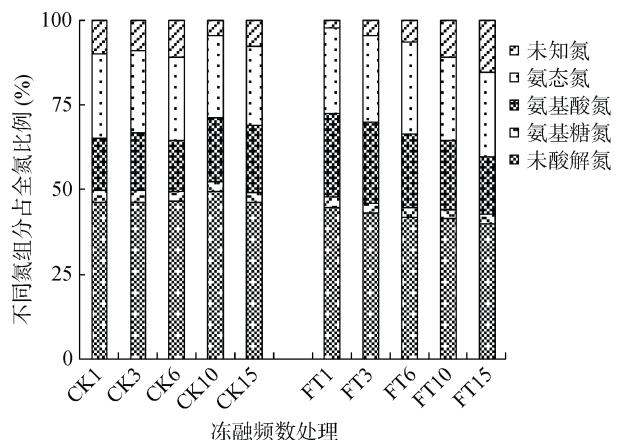


图 5 不同冻融频数作用下农田黑土有机氮组分分配比例

Fig. 5 Proportions of various fractions of organic N to total N in the cultivated black soil affected by freezing-thawing frequency

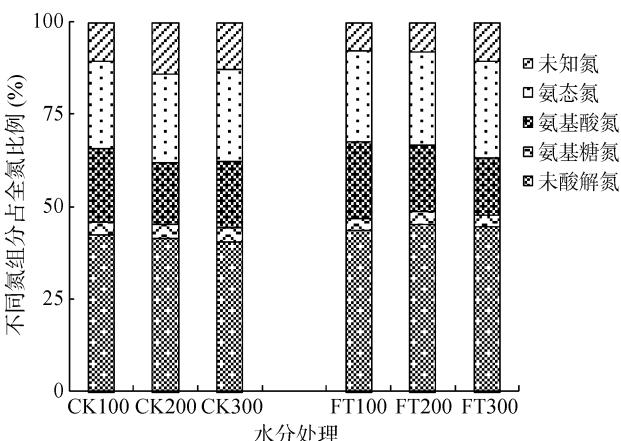


图 6 不同水分含量作用下冻融农田黑土有机氮组分分配比例

Fig. 6 Proportions of various fractions of organic N to total N in the FTCs-treated cultivated black soil affected by moisture regime

3 讨论

有机氮的化学形态及其存在状况是影响土壤氮

素有效性的重要因子^[2]。已有的研究更加强调施肥、灌溉等人为因素对有机氮组分特征的影响，而对冻融交替等自然因素的影响关注较少^[3]。本研究中，冻融作用造成农田黑土有机氮组分及其含量的显著变化，但各组分变化行为受冻融温度、冻融频数和水分含量的协同影响(图 1 ~ 图 6)，这是由于冻融作用通过改变土壤水分状况和分布引起土壤结构、孔隙等物理性状的变化，破坏土壤团聚体和微生物群落结构，利于释放出土壤包裹吸附着的小分子，为残留微生物提供足够的养分，进而引起土壤氮矿化和养分含量的变化^[24,28]。可见，本试验条件下，土壤有机氮组分变化的主要驱动因子是冻融温差、冻融频数和水分含量。较大的冻融温差更容易致使土壤微生物细胞裂解，进而释放到土壤中更多的无机氮^[29]，这也佐证了本研究中较大的冻融温差造成土壤有机氮酸解率较低的研究结果(表 1)。

氨基酸氮作为酸解产物中主要可鉴别的含氮化合物，其主要来源于微生物和动植物残体及其分泌物中蛋白质、多肽等的水解^[3,30]。本研究中氨基酸氮含量的变化范围在 271.98 ~ 439.65 mg/kg，占土壤全氮的 15.35% ~ 24.81%，这与徐俊俊等^[3]的研究结论相一致。Stevenson^[31]研究认为，室内冻融交替中，微生物生物量氮是土壤氨基酸氮的主要来源。本研究中，随着冻结温度降低，土壤氨基酸氮含量显著增加；当冻结温度为-12°C 和-15°C 时，其含量分别为 406.42 mg/kg 和 414.00 mg/kg(平均值)，较-3°C 冻结时分别增加了 24.82% 和 27.15%(图 1)。这是因为冻融作用能够造成土壤微生物死亡^[32]，死亡的微生物在分解过程中释放到土壤中一些小分子糖、氨基酸等含氮化合物，进而增加了氨基酸氮含量^[33]。更低的冻结温度造成更严重的土壤物理结构破坏和微生物死亡，进而释放更多的养分^[34]。随着冻融频数增加，冻融土壤氨基酸氮含量显著降低(图 2)，说明短期冻融对土壤氨基酸氮含量影响较大，这也佐证了 Grogan 等^[35]的研究结果。其原因可能是：一方面，连续的冻融循环使土壤微生物逐渐适应了温度变化，死亡微生物的绝对量逐渐减少，进而降低了释放到土壤中的氨基酸氮含量；另一方面，来自于土壤团聚体的可溶性有机氮含量随着冻融循环次数增加逐渐降低，而土壤中原有的可溶性有机氮由于矿化作用不断地被微生物利用分解，导致土壤中氨基酸氮含量降低^[36]。随着水分含量增加，冻融土壤氨基酸氮含量显著降低(图 3)，说明较低的水分含量对冻融土壤氨基酸氮含量影响较大。这与冻融过程中较高的水分

含量对土壤微生物产生更强的破坏作用、导致更多微生物死亡的结论^[37-38]相反,可能与土壤特性、试验方法等差异有关。

氨基糖主要存在于真菌的几丁质结构中,微生物细胞壁是土壤中氨基糖的主要来源^[3, 6, 14]。本研究发现,除2℃融化土壤氨基糖氮含量随着冻结温度降低显著增加外,其他冻融处理土壤氨基糖氮含量均无显著性变化(图1、图2、图3)。说明,冻融温度是影响土壤氨基糖氮的主要驱动因子。这是因为,一方面,剧烈的温度变化导致微生物死亡,细胞壁的破裂增加了土壤中的氨基糖氮含量;另一方面,冻结时土壤孔隙中冰晶的膨胀打破颗粒之间的联结,破坏土壤团聚体,呈现将大团聚体碎成小团聚体的趋势^[39]。土壤团聚体稳定性的破坏有利于被土壤包裹吸附着的小分子物质提前释放出来,如小分子的氨基酸、糖类等^[3]。

本研究中冻融土壤氨态氮含量的变化范围为418.32~478.89 mg/kg,占全氮含量的比例为23.61%~27.03%,这与梁国庆等^[40]的研究结果一致。在不同冻融温度作用下,-12℃和-15℃冻结处理氨态氮含量的变化幅度最大(图1),说明剧烈的冻结温度对氨态氮的影响更为明显。在不同冻融频数和水分含量作用下,频数6和水分含量300 g/kg冻融处理土壤氨态氮含量最高,分别为478.89 mg/kg和464.46 mg/kg(图2、图3)。分析氨态氮含量变化行为的原因,可能一部分是酸解过程中部分氨基酸和氨基糖脱氨产生,另一部分来自酰胺类化合物;同时,冻融作用可能导致土壤有机和无机胶体中以前不可利用的NH₄⁺-N释放^[38]。但是,在测定过程中以氨形式损失的部分在现有条件下不能作出准确的估计,需要以后进一步深入研究。

土壤中未知氮的来源比较复杂,目前对它的形态和性质还不清楚^[30]。本研究中冻融土壤未知氮含量的范围为31.34~277.07 mg/kg,约占土壤全氮的比例为1.77%~15.64%。与-3℃冻结处理相比,-12℃和-15℃冻结处理土壤未知氮含量的降低幅度最大,分别为39.45%和44.69%(平均值)(图1),说明较大的冻融温差对土壤未知氮含量影响程度较大。在其他冻融因子作用下,频数15和水分含量300 g/kg处理的冻融土壤未知氮含量均明显增加,分别较频数1和水分含量100 g/kg处理增加了586.45%和36.35%(图2、图3),说明长期冻融和高水分含量对土壤未知氮的影响程度较大。分析冻融土壤未知氮含量变化行为的原因,一方面可能由于微生物的活动;另一方

面可能由于非蛋白组分的氨基酸氮存在于土壤中,被胶体颗粒固定而不能为茚三酮检测^[3]。另外,未知氮中约有20%~49%为非α-氨基酸态氮,较不宜分解^[3]。具体原因有待于以后进一步的研究。

已有研究表明,酸解氮对土壤可矿化氮的贡献较大^[41-42],土壤可矿化氮主要来源于酸解氮^[43],尤其是氨态氮和氨基酸氮^[44]。但也有研究表明,土壤可矿化氮的主要贡献者是氨基酸氮^[45]和未知态氮^[46]。本研究中,不同冻融因子作用下农田黑土酸解氮组分含量的分配比例不同,但均以氨态氮的最高,其次是氨基酸氮(图4~图6)。总的来说,冻融频数作用下农田黑土氨态氮和氨基酸氮含量及其分配比例高于冻融温度和水分含量作用下土壤(图4~图6)。因此,不同冻融因子作用下农田黑土酸解氮组分含量及其分配比例的差异也必然会影响到土壤氮素的有效性,这还需要进一步研究与探讨。

4 结论

冻融作用对农田黑土有机氮组分特征及其含量变化影响显著。随着冻融因子(冻融温度、冻融频数、水分含量)变化,农田黑土酸解有机氮组分(氨态氮、氨基酸氮、氨基糖氮、未知氮)含量及其分配比例均发生显著变化;其中,氨态氮和氨基酸氮是土壤酸解有机氮的主要组分,也是土壤活性氮的主要贡献因子。较大的冻融温差、适宜的冻融频数和水分含量是影响土壤有机氮库转化的主要驱动因子。可见,在季节性冻融期间,冻融作用能够提高土壤酸解有机氮中氨态氮和氨基酸氮的含量及其分配比例,增加土壤可矿化氮量,促进土壤氮素转化,有利于土壤有效氮的累积,为春季作物生长提供足够的氮素。

参考文献:

- [1] 罗如熠,张世熔,徐小逊,等. 黑河下游湿地土壤有机氮组分剖面的分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 956-964.
- [2] 李世清,李生秀,邵明安,等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 859-864.
- [3] 徐俊俊,吴彦,张新全,等. 冻融交替对高寒草甸土壤微生物量氮和有机氮组分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(1): 57-62.
- [4] 王克鹏,张仁陟,索东让. 长期施肥对河西灌漠土有机氮组分的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 699-703.
- [5] 李强,王晋,庄舜尧. 我国南方不同地带性水稻土有机氮组分变化[J]. 土壤, 2015, 47(5): 940-946.
- [6] Bremner J M. Methods of soil analysis[M]. Madison, USA: American Society of Agronomy Press, 1965: 1148-1178.

- [7] 王晋, 庄舜尧, 朱兆良. 不同种植年限水田与旱田土壤有机氮组分变化[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 286–294.
- [8] 张玉玲, 顾婉宣, 丛耀辉等. 下辽河平原两种类型水稻土有机氮组分的研究[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1021–1026.
- [9] 任金凤, 周桦, 马强, 等. 长期施肥对潮棕壤有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1661–1667.
- [10] 李玥, 余亚琳, 张欣, 等. 连续施用炭基肥及生物炭对棕壤有机氮组分的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2903–2909.
- [11] 张玉树, 张金波, 朱同彬, 等. 不同种植年限果园土壤有机氮组分变化特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1229–1233.
- [12] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH₃ 挥发及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5556–5564.
- [13] 贾倩, 廖世鹏, 卜容燕, 等. 不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1547–1558.
- [14] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 99–104.
- [15] Xi N, Carrere P, Bloor J M G. Nitrogen form and spatial pattern promote asynchrony in plant and soil responses to nitrogen inputs in a temperate grassland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 71: 40–47.
- [16] Henry H. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 977–986.
- [17] 朴春和, 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.
- [18] Herrman A, Witter E. Source of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze thaw cycles in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 1495–1505.
- [19] 王风, 韩晓增, 李良皓, 等. 冻融过程对黑土水稳定性团聚体含量影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 915–919.
- [20] 田路路, 隽英华, 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.
- [21] Elliott A C, Hugh A L, Henry H. Freeze-thaw cycle amplitude and freezing rate effects on extractable nitrogen in a temperate old field soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45: 469–476.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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: 1–303.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544–552.
- [29] 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.
- [30] 卓苏能, 文启孝. 土壤未知氮[J]. 土壤学进展, 1992, 20(2): 11–19.
- [31] Stevenson F. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients[M]. New York, USA: A Wiley-Interscience Publication. John Wiley Sons, 1986: 173–178.
- [32] 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.
- [33] Wang L, Bettany R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4): 709–714.
- [34] 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.
- [35] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in subarctic heath tundra mesocosms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(4): 641–654.
- [36] Campbell C A, Biederbeck V O. Influence of fluctuating temperatures and constant soil moistures on nitrogen changes in amended and unamended loam[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1972, 52: 323–336.
- [37] Ron Vaz M D, Edwards A C, Shand C A, et al. Changes in the chemistry of soil solution and acetic-acid extractable P following different types of freeze/thaw episodes[J]. European Journal of Soil Science, 1994, (45): 353–359.
- [38] 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, 2006, 35(1): 247–255.
- [39] Lehrsch G A, Sojka R, Carter D L. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55 (5): 1401–1406.
- [40] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 3–10.
- [41] 王瑞军, 李世清, 张兴昌, 等. 西北地区不同生态系统几种土壤中有机氮组分和微生物体氮的差异[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 21–27.
- [42] 胡晓航, 陈立新, 周建朝, 等. 黑土有机氮组分在甜菜生长季矿化特征的研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 189–194.
- [43] 沈其荣, 史瑞和. 不同土壤有机氮的化学组分及其有效性的研究[J]. 土壤通报, 1990, 21(2): 54–57.
- [44] 李菊梅, 李生秀. 可矿化氮与各有机氮组分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 158–164.
- [45] 王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同施肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1173–1180.
- [46] 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.