

高敏, 李艳霞, 张雪莲, 等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2269-2274.

GAO Min, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, et al. Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2269-2274.

冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望

高敏¹, 李艳霞^{1*}, 张雪莲², 张丰松³, 刘蓓¹, 高诗颖¹, 陈兴财¹

(1. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京市土肥工作站, 北京 100029; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 冻融是我国北方地区常见的气候现象, 其水热条件的反复变化会影响土壤等环境介质的物理化学及生物学性质。冻融过程产生的交替收缩与膨胀可改变土壤结构、水分分布特征, 尤其会降低土壤团聚体的稳定性; 由于温度、水分、氧化还原等条件的不断变化, 冻融过程会促进土壤硝化作用和溶解性有机酸的释放, 使土壤微生物量及其活性受到影响, 导致土壤 pH 值、CEC 和 CaCO_3 含量等随之降低。在冻融过程中, 土壤有机质的变化最为明显, 反复冻融使有机碳不同程度地暴露和释放, 加快了土壤有机碳矿化速率, 使土壤可溶性有机碳量增加, 最终加剧可溶性有机碳的流失。以往对冻融作用的研究主要集中在自然土壤介质, 缺乏对其他环境介质如畜禽粪便等有机固体废弃物的相关报道。在综述冻融过程对土壤物理、化学及生物学性质影响的基础上, 提出了未来在一定区域尺度上开展冻融过程对土壤理化性质影响研究, 并结合探讨畜禽粪便等有机固体废弃物和土壤污染物的响应机制, 为冻融气候条件下土壤污染控制和科学土地利用管理提供科学依据。

关键词: 冻融过程; 土壤; 理化性质; 生物学性质

中图分类号: S15 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)12-2269-06 doi:10.11654/jaes.2016-1087

Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review

GAO Min¹, LI Yan-xia^{1*}, ZHANG Xue-lian², ZHANG Feng-song³, LIU Bei¹, GAO Shi-ying¹, CHEN Xing-cai¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Soil and Fertilizer Extension Service Station, Beijing 100029, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, Beijing 100101, China)

Abstract: Freeze-thaw process is a natural phenomenon in Northern China. The fluctuation of hydrothermal conditions may strongly influence soil physicochemical properties, microbial enzymatic activities and total microbial community abundance. The alternating contraction and expansion caused by freeze-thaw process may alter soil structure and water distribution, which especially reduce soil aggregates water stability and bulk density. Because of the fluctuations in soil temperature, water distribution and redox conditions, as a consequence of the freezing-thaw process will accelerate the soil nitrification and release of soluble organic acids. Accordingly, soil pH value, CEC and CaCO_3 content will be reduced. The organic matter composition is typically affected during freeze-thaw process. In this process, various forms of organic carbon in soil aggregates will be exposed, dissolved organic matter (DOM) will be released into the aqueous phase and as a result, the soil components absorbed by soil aggregate and organic matter become more mobilized. However, previous studies mainly focused on the effects of freeze-thaw process on natural soils while other types of environmental matrixes have always been neglected. On the basis of previous studies, investigations into the effects of soil pollutants are recommended due to their deep connection with the soil organic components. Furthermore, large amounts of organic solid wastes like animal manure and farm waste have to be used in farmland. The organic wastes change the bulk density, enhance the microbial activity and carbon stock in the soil, protect soil from water erosion should be considered in freeze-thaw process.

Keywords: freeze-thaw process; soil; physicochemical property; biological property

收稿日期: 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21577007, 21277013); “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0800204)

作者简介: 高敏 (1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事固体废物资源化处理和污染物环境行为研究。

* 通信作者: 李艳霞 E-mail: liyxbnu@bnu.edu.cn

冻融是指日、年和多年发生在高海拔、高纬度或温带地区的气候变化现象,可导致特定气候区域地球表层一定范围的环境介质冻结和融化。地球上中纬度($35^{\circ}\sim 65^{\circ}$)大部分地区存在季节性冻融过程^[1],我国75%以上的国土面积会发生冻融现象,它是我国北方地区重要的气候特征^[2]。由于全球气候变暖,冻融对土壤特别是冻土区土壤碳库生物地球化学循环过程的影响是当前国内外的研究热点^[3-5]。冻融过程通过影响环境介质的水热条件,影响使土壤理化性质发生改变。连续重复的冻融交替过程中存在的温差变化、冰面对固体颗粒的剪切作用、微生物的低温活动等现象,会使土壤经历一系列物理、化学和生物变化过程,从而对土壤介质的理化性质、生物特性产生影响^[6]。

1 冻融过程对土壤理化性质的影响

冻结和融化实质是土壤介质中水的冻结和融化,即水分的相态变化过程,当液态水相变成冰,体积会相应增大^[7-8]。冻融过程对土壤中水分分布及毛细管结构的破坏,如图1所示。

土壤介质中的孔隙水在 0°C 以下结冰,液态水相变成冰,体积增大9%^[7,9]。冰的形成对周围颗粒产生

挤压(图1b),冻结时土壤孔隙中冰晶的膨胀打破了颗粒之间的联结,这种挤压作用使土壤大团聚体破碎成小团聚体,而细小颗粒物有向周围相对大的颗粒聚集的趋势,使固体颗粒变得紧实缩小。冰夹层或缝隙也会增多,由于水分的主动运输作用,未冻结部分的水分不断向冻结的冰面迁移^[10],进一步的冻结使介质被冰分割成层状及网状(图1d),冻结过程中毛细管压力降低产生大量的小颗粒(图1e)^[11]。由于水分流失,介质中的部分微生物细胞脱水,细胞膜的完整性被破坏,部分微生物细胞死亡。当温度到 0°C 以上冰开始融化时,水分连同其中的溶解性组分可很快从冰融化的缝隙中排出^[12-13](图1f)。由此可以看出,冻融所产生的物理作用会加速大颗粒固体介质的破碎,增强土壤释水性和水分渗透系数等^[13],同时伴随融化过程中可溶性组分的溶出和迁移^[5]。

研究显示,冻融对土壤物理结构及稳定性的破坏,受冻融速率、冻融温度、土壤含水量、土壤自身容重及冻融交替次数等的影响^[12,14-15]。土壤冻融作用的本质就是土体内水分体积变化引起的土壤特性的变化,所以土壤含水量与冻融作用有密切联系。温美丽等^[9]在对东北黑土进行冻融研究时发现,土壤容重经过冻融后都呈现减小的趋势,但是含水量不同的土壤其容重减少程度有差别,对于受冻融影响最明显的表层土壤而言,高含水量时表层5 cm内土壤容重减小幅度大于低含水量时。因此,土壤含水量不同会使冻融对土壤团聚体产生不同的破坏作用,冻融的影响随土壤含水量的增加而增强。但研究也发现,当含水量超过土壤饱和含水量后冻融对团粒结构的破坏作用开始下降^[12-13]。

冻融的温度以及冻融交替次数对土壤团聚体的影响也很明显。实验证明,冻融交替次数越多,对土壤团粒结构稳定性影响越大,随冻融交替次数增加,壤土、砂壤土中 $>1\text{ mm}$ 团粒结构比例迅速降低,相应 $<0.5\text{ mm}$ 的团粒结构比例逐渐增加^[16];在 $-15\sim -35^{\circ}\text{C}$ 冻结温度处理下,冻结温度越低,冻融作用对大团聚体的破坏作用越强,并且越利于向中级团聚体转化^[17]。说明增加冻融交替次数以及降低冻融温度会加剧冻融过程对土壤结构的分散作用,使疏松的小容重土壤变得更加致密,而大容重土壤变得疏松。但是增加土壤有机质和粘粒的含量,会提高土壤团聚体的稳定性^[12,15,18]。

冻融不但对土壤结构产生影响,同时可能改变土

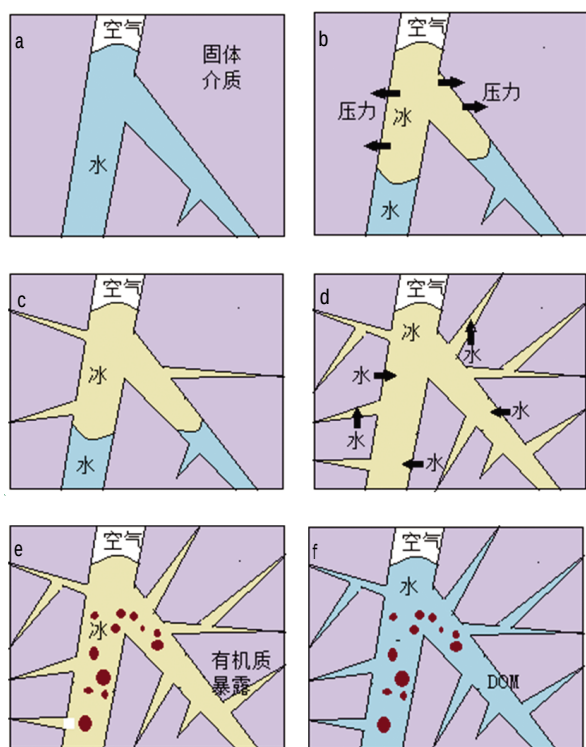


图1 冻融过程中土壤毛细管结构的变化特征
Figure 1 Changes of soil capillary structure during the freeze-thaw process

壤的 pH 值、Eh、EC 和 CEC 等化学性质。首先冻融过程会促进土壤的硝化作用^[4]和溶解性有机酸的释放^[19],使土壤溶液 pH 值随之降低,土壤溶液 H^+ 浓度的增加^[20],也会影响土壤的氧化还原状态,使得土壤 Eh 升高^[17]。同时,土壤溶液 pH 值的下降使土壤胶体表面所载的负电荷减少,从而引起土壤 CEC 的降低^[21]。然而随着冻结温度升高,土壤 CEC 会增加,虽然其机理目前尚不明确,但分析认为 CEC 的变化可能与土壤中的有机质胶体密切相关。土壤交换性阳离子以土壤有机或无机胶体为载体,有机胶体的 CEC 远大于矿质胶体,冻结温度的变化影响有机质进而增加土壤 CEC^[17]。由此可见,冻融过程中土壤化学性质的变化往往相互关联。

2 冻融过程对土壤生物学性质的影响

冻结和融化过程中,温度、水分以及土壤颗粒释放出的小分子有机质的变化,会导致土壤微生物种群数量及结构在冻融过程中的不断改变^[18-22]。微生物量的变化是由环境介质的温度、湿度、基质的可利用性和溶解的速率决定的^[23],它也是参与调控有机质转化的易变组分。在冻结温度下,孔隙水结冰,未冻结部分水分向冰面的迁移导致微生物脱水死亡。另外,由于缺乏水分,基质的流动性和可利用性受限^[24],这种条件下微生物难以维持其活性,造成微生物量降低。但是随着冻融交替次数的增加,微生物能够通过改变土壤中有机质的性质来适应冻融环境^[25],因此冻融交替会使微生物量及结构处于不断变化的过程。研究显示,真菌是木质素的主要分解者,土壤经过冻融后真菌的生物量降低,木质素这种难降解的有机质变化将减少^[26]。Koponen 等^[25]研究发现,随着冻融交替次数的增加,微生物会通过改变基质的碳链长度或脂肪酸的饱和度来适应环境,使其活性得到恢复。Feng 等^[26]也证实,土壤在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结和 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下融化的 8 个冻融交替后,其中真菌和细菌活性恢复率高达 93%。有研究^[27-28]发现,季节性冻融过程使休耕期土壤中微生物种群和生命活动过程与生长季不同, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 强烈的冻结会减少真菌生物量而细菌生物量不受影响;冻结过程中氧气、水分和营养物等的利用受到限制,会激发厌氧细菌和兼性厌氧菌的活性,因为它们具有较强的生命力,能够在一定的温度、压力下利用额外的有机质。Larsen 等^[29]研究认为,多次冻融交替可以使土壤微生物群落由 C/N 比较高的真菌群落转变为 C/N 比较低的细菌群落,从而改变土壤中有机质分解与

固持的能力^[30]。以上研究说明,冻融过程对土壤微生物代谢群落的影响存在一定差异。

土壤酶是土壤中一切生物化学过程的主要参与者,目前对冻融过程土壤介质中酶活性的研究较少,现有研究表明冻融过程能够影响酶活性^[6],但是因所观察的土壤类型以及酶的种类和性质不同而存在差异。土壤 β -葡萄糖苷酶在连续冻融后降低 16%,而磷酸酶呈波动性变化^[31]。反硝化酶活性存在季节性变化,可在一年中最冷的月份观测到比较活跃的土壤反硝化酶活性,土壤融化加剧了反硝化反应^[32]。对比未冻融处理,东北黑土经历冻融后土壤 FDA 水解酶、蛋白酶、纤维素酶和过氧化氢酶的活性均降低^[17];由于土壤冻结时,部分土壤微生物受到低温胁迫而死亡,死亡微生物数量越多,产生的酶数量越少;冻结温度越低,酶的活性下降越明显^[33]。谯兴国等^[34]研究却发现,石油污染的土壤冻融处理对土壤过氧化氢酶活性无显著性影响,而未污染土壤经冻融处理后,土壤过氧化氢酶和脲酶活性却分别提高了 47.65% 和 41.11%,并且水溶性有机碳比未冻融处理土壤明显增高。大部分研究认为,冻融可增加土壤酶活性从而促进土壤大分子有机质的降解^[35],而且酶反应还能提高微生物对结构复杂芳香化合物,如木质素或腐化的有机质的代谢能力^[36]。

以上研究说明,土壤微生物及酶活性在冻融环境下的变化没有必然趋势,不同介质环境中的微生物有不同的形态、生长方式、生态位,由于环境介质中有机质等条件的不同,它们对冻融过程的反应也不同,最终导致介质中有机质及污染物的释放也不同^[25,37]。

3 冻融过程对土壤有机质的影响

冻融过程中有机质变化是通过物理、化学及生物共同作用实现的。

冻融过程土壤有机质可能经历如下过程:(1)挤压和剪切作用下大颗粒的破碎,使被包裹的碳水化合物、脂肪酸和固醇类等暴露,使有机溶剂可提取量增至原来的 2~3 倍,更利于微生物接触及利用^[26];此外,冻融过程中与固体颗粒结合的大分子有机质膨胀与收缩,其中的氢键等发生断裂,释放出小分子量有机质^[29]。(2)未冻结部分水分向冻结冰面的迁移会携带部分有机质,融化后产生较多的溶解性有机质(DOM)^[38]。(3)水分相态的变化导致有机质收缩,引起与固体颗粒结合位点的破坏,增加有机质的释放;部分微生物细胞在低温度下死亡,释放出糖类和氨基

酸等可利用的碳源,增加溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)等的溶出^[6]。(4)冻融过程对介质粒径的破坏会产生更多比表面积大的细颗粒(<0.075 mm)、粘土颗粒(0.005 mm)及有机胶体,它们对有机质等具有更强的吸附力,也会导致土壤溶液中的有机质重新分配或溶出^[11,39]。

冻融过程通过影响介质的温度变化速率、水分和营养物的迁移特征来改变微生物量及其活性,这是影响和调控土壤有机质矿化的重要机制^[40]。微生物可利用有机质的主要来源是颗粒破碎暴露的有机质、微生物细胞死亡释放的可溶性有机质、微生物量碳氮等,其中不稳定易分解的有机质如微生物生长所需的蛋白质、脂肪类、醇类、游离脂质等最先受到冻融过程的影响^[36]。冻融交替对土壤易降解碳影响明显,随着冻结温度和冻融频次的增加,土壤水溶性有机碳含量上升最为显著,微生物量碳则相应减少,究其原因仍然是来自固体颗粒破坏后暴露的有机质以及死亡的微生物细胞溶解释放较多的单糖和氨基酸^[8],微生物量碳转化为可溶性有机碳,同时土壤中冰晶快速形成破坏了微生物细胞机构,使其转化为其他微生物可利用的有机碳,导致微生物量碳含量下降。同时,冻融过程中土壤有机物质从颗粒物上释放,土壤植物根死亡输入的活性物质等提高了微生物的活性,加快了土壤中有机质的矿化与硝化过程,也促使土壤中可溶性有机碳含量增加^[41],冻融过程不但会增加土壤 DOM 含量,还能改变土壤 DOM 的荧光特征,增强其分子的芳香化程度和腐殖化程度^[42]。然而,这些可溶性及易降解碳占土壤总碳比重较小,所以冻融对土壤总有机碳的含量影响不大^[41],总有机质同时受冻结温度、冻融过程频次、有机质的溶解性、胶体携带等因素的综合影响^[43]。

4 研究展望

综上所述,冻融虽然是一个水相变化的物理过程,但是其通过影响介质物理结构、化学性质、微生物种群及结构等,引起土壤中有有机质、矿质元素等组分的改变。在全球变暖背景下,冻融作用对土壤有机质矿化及温室气体排放的影响受到广泛关注。但是,随着对土壤面源污染控制研究的深入开展,还存在一些未受到关注的重点领域,主要表现为:

(1)以往研究多是围绕苔原、森林、草原、湿地、农田和冻土等自然土壤介质展开,对于同样可能经历冻融过程的其他环境介质如畜禽粪便、污水污泥等鲜有

报道。我国每年有几十亿吨的畜禽粪便等有机固体废弃物进入土壤环境,在北方地区会经历最长 7 个月的秋冬季节冻融过程。畜禽粪便等含有远高于土壤的水分和有机质,经历冻结-融化循环过程时,其物理化学和生物学性质的响应及其对土壤组分的影响可能比自然土壤更为明显或剧烈。因此,研究这些有机固体废弃物对冻融过程的响应机制,对于温室气体排放以及土壤面源污染控制具有重要的理论和实际意义。

(2)针对冻融过程的研究,不应仅仅局限于对土壤碳、氮循环的影响及温室气体排放的效应方面,土壤介质在冻融过程中物理化学及生物学性质的变化,不但会造成有机质矿化速率的提高和可溶性有机碳的增加,土壤中所存在的其他组分如有机、无机污染物也会随之受到影响。研究冻融过程中土壤有机质组分、土壤团聚体与污染物的结合特征及影响机制,对土壤污染控制具有现实的指导意义。

(3)由于室内模拟实验的可控性,目前大多数的研究集中在室内模拟层面。建议更多开展一定区域尺度下冻融过程对土壤介质的影响研究,以便掌握实际土壤生态位条件下土壤各组分对冻融作用的响应特征,这对区域面源污染控制和科学土地利用管理具有重要的实践意义。

参考文献:

- [1] Hobbie S E, Chapin F S. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35(2): 327-338.
- [2] 王澄海,靳双龙,施红霞.未来 50 年中国地区冻土面积分布变化[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 1-8.
WANG Cheng-hai, JIN Shuang-long, SHI Hong-xia. Area Change of the frozen ground in China in the next 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 1-8.
- [3] Leifeld J, Fuhrer J. The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 75(3): 433-453.
- [4] 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.
- [5] Safadoust A, Mosadeghi M R, Mahboubi A A, et al. Effects of wetting/drying, freezing/thawing and earth worm activities on soil hydraulic properties[J]. *Journal of Water & Soil*, 2012, 26(2): 340-348.
- [6] 王娇月,宋长春,王宪伟,等.冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 442-452.
WANG Jiao-yue, SONG Chang-chun, WANG Xian-wei, et al. Progress in the study of effect of freeze-thaw progresses on the organic carbon pool and microorganisms in soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 442-452.
- [7] Zhao L, Cheng G D, Ding Y J. Studies on frozen ground of China[J].

- Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4): 411-416.
- [8] 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: 641-654.
- [9] 温美丽, 刘宝元, 魏 欣, 等. 冻融作用对东北黑土容重的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 492-495.
- WEN Mei-li, LIU Yuan-bao, WEI Xin, et al. Impact of freezing and thawing on bulk density of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 492-495.
- [10] McMinn W, Keown J, Allen S J, et al. Effect of freeze-thaw process on partitioning of contaminants in ferric precipitate[J]. Water Research, 2003, 37(20): 4815-4822.
- [11] Mohanty S K, Saiers J E, Ryan J N. Colloid-facilitated mobilization of metals by freeze-thaw cycles[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(2): 977-984.
- [12] 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.
- [13] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8.
- [14] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils[J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(2): 193-204.
- [15] Lehrs G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability[J]. Soil Science, 1998, 163(1): 63-70.
- [16] 张海欧, 解建仓, 南海鹏, 等. 冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 273-278.
- ZHANG Hai-ou, XIE Jian-cang, NAN Hai-peng, et al. The interaction of freezing-thawing on soil aggregates and organic matter of pisha sandstone and san compound soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 273-278.
- [17] 李琳慧, 李 旭, 许 梦, 等. 冻融温度对东北黑土理化性质及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 318-320.
- LI Lin-hui, LI Xu, XU Meng, et al. Impact of freeze-thaw temperature on physical-chemical properties and soil enzyme activities[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(4): 318-320.
- [18] 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.
- WANG Yang, LIU Jing-shuang, WANG Quan-ying. The effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [19] 王 洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91-96.
- WANG Yang, LIU Jing-shuang, WANG Guo-ping, et al. Study on the effect of freezing and thawing action to soil physical and chemical characteristics[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(2): 91-96.
- [20] 周旺明, 秦胜金, 刘景双, 等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 806-811.
- ZHOU Wang-ming, QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, et al. Effects of temperature and freeze-thaw on soil nitrogen mineralization in typical wetlands in Sanjiang Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 806-811.
- [21] 沈 月, 依艳丽, 张大庚, 等. 耕地棕壤酸碱缓冲性能及酸化速率研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 95-100.
- SHEN Yue, YI Yan-li, ZHANG Da-geng, et al. Research on pH buffer capacity and acidification rate of arable brown soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 95-100.
- [22] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(8): 1061-1066.
- [23] Katoh M, Kitahara W, Sato T. Sorption of lead in animal manure compost: contributions of inorganic and organic fractions[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2014, 225(1): 1-12.
- [24] Hu K, Jiang J Q, Zhao Q L, et al. Conditioning of wastewater sludge using freezing and thawing: Role of curing[J]. Water research, 2011, 45(18): 5969-5976.
- [25] Koponen H T, Jaakkola T, et al. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1861-1871.
- [26] Feng X, Nielsen L L, Simpson M J. Responses of soil organic matter and microorganisms to freeze-thaw cycles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 2027-2037.
- [27] 邓西民, 王 坚, 朱文珊, 等. 冻融作用对梨底层土壤物理性状的影响[J]. 科学通报, 1999, 43(23): 2583-2587.
- DENG Xi-min, WANG Jian, ZHU Wen-shan, et al. Effect of freeze-thawing on plough layer soil physical properties[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 43(23): 2583-2587.
- [28] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 977-986.
- [29] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187-195.
- [30] 宋 阳, 于晓菲, 邹元春, 等. 冻融作用对土壤碳、氮、磷循环的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(2): 78-90.
- SONG Yang, YU Xiao-fei, ZHOU Yuan-chun, et al. Progress of freeze-thaw effects on carbon, nitrogen and phosphorus cyclings in soils[J]. Soil and Crop, 2016, 5(2): 78-90.
- [31] Chaer G M, Myrold D D, Bottomley P J. A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(4): 822-830.
- [32] Pelletier F, Prévost D, Laliberté G, et al. Seasonal response of denitrifiers to temperature in a Quebec cropped soil[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79(4): 551-556.
- [33] 汤 洁, 梁 爽, 张 豪, 等. 吉林西部盐碱水田区冻融期土壤水盐运移特征及酶活性变化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 636-644.
- TANG Jie, LIANG Shuang, ZHANG Hao, et al. Study on the characteristics of water-salt transfer and enzyme activity variation during freeze-thaw period of Saline-Alkaline Paddy soil in western Jilin

- Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2): 636-644.
- [34] 谯兴国, 李法云, 张 营, 等. 冻融作用对石油污染土壤酶活性和水溶性碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 914-919.
- QIAO Xing-guo, LI Fa-yun, ZHANG Ying, et al. The Effect of freezing and thawing on enzyme activity and dissolved organic carbon in petroleum contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 914-919.
- [35] 邱莉萍, 刘 军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2004, 10(3): 277-280.
- QIU Li-ping, LIU Jun, WANG Yi-quan, et al. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 277-280.
- [36] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1785-1795.
- [37] Boer W, Folman L B, Summerbell R C, et al. Living in a fungal world: Impact of fungi on soil bacterial niche development[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2005, 29(4): 795-811.
- [38] Slavik I, Müller S, Mocosch R, et al. Impact of shear stress and pH changes on floc size and removal of dissolved organic matter (DOM)[J]. Water Research, 2012, 46(19): 6543-6553.
- [39] Dang Z, Liu C, Haigh M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils[J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 419-426.
- [40] Stenrød M, Eklo O M, Charnay M P, et al. Effect of freezing and thawing on microbial activity and glyphosate degradation in two Norwegian soils[J]. Pest Management Science, 2005, 61(9): 887-898.
- [41] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 等. 冻融作用对黑土有机碳数量变化的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 984-990.
- LIU Shu-xia, WANG Yu, ZHAO Lan-bo, et al. Effect of freezing and thawing on the content of organic carbon of black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 984-990.
- [42] 汪太明, 王业耀, 香 宝, 等. 交替冻融对黑土可溶性有机质荧光特征的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2136-2140.
- WANG Tai-ming, WANG Ye-yao, XIANG Bao, et al. Effect of freezing and thawing cycles on fluorescence characterization of black soil dissolved organic matter [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2136-2140.
- [43] Koponen H T, Martikainen P J. Soil water content and freezing temperature affect freeze-thaw related N_2O production in organic soil[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69(3): 213-219.