

冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响

王洋, 刘景双*, 王全英

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012

摘要: 团聚体是土壤结构的基本构成单位。在矿物颗粒和有机质等成分参与下, 通过土壤微生物以及干湿、冻融交替等自然物理过程协同作用形成不同大小的土壤团聚体。土壤有机碳的稳定机制决定着土壤固定和储备有机碳的能力, 而土壤团聚体的稳定性及其有机碳的分布是反映团聚体对有机碳物理保护作用的关键。土壤冻融作用的交替收缩与膨胀可改变团聚体的结构与组成, 对土壤结构和水分分布特征具有明显影响, 降低土壤团聚体的水稳性。通过影响土壤温度变化速率、通气性以及水分和营养物质的迁移, 冻融作用影响微生物量及其活性, 冻融过程也加快土壤有机碳和植物残留物矿化分解速率, 致使有机碳组分的固定与活化产生分异, 进而促进土壤有机碳的迁移转化, 冻融初期土壤活性有机碳含量会显著增加。受到冻融作用的土壤团聚体中各种形态的有机碳都会不同程度的暴露出来, 有机碳在不同结构的团聚体中进行重新分配, 影响土壤有机碳源/汇的强度及变化趋势。冻融过程中土壤水分显著提高, 土壤有机碳等养分易于溶出, 或通过各种途径包裹在矿物颗粒内或吸附于土壤胶体表面随水迁移而流失。冻融作用初期对土壤有机碳的流失影响较大, 但频繁的冻融循环有利于增强团聚体对有机碳的保护作用。

关键词: 冻融作用; 环境效应; 团聚体; 有机碳

中图分类号: S152.7; P314.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 07-1269-06

引用格式: 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 Jingshuang, WANG Quanying. The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1269-1274.

环境温度的周期性变化, 形成了土壤季节融化层与季节冻土层热学性质的差异, 导致土水体系在季节转换的过程中发生频繁的冻融交替过程。冻融是作用于土壤的非生物应力, 可显著改变土壤结构和土壤物质相态组成、迁移转化等, 使土壤经历一系列的物理、化学和生物过程。地球上中纬度大部分地区经受季节性冻融过程, 我国东北、西北及西南的高海拔地区, 都不同程度地受到土壤冻融的影响, 多年冻土和季节冻土面积占全国面积的 75%以上^[1]。土壤冻融作用对陆地生态系统的演替和变异具有举足轻重的作用, 一定程度上决定了一个地区的生态系统状况^[2-3]。冻融作用对土壤的影响程度主要取决于冻融速率、冻融温度、冻融交替以及含水量、有机质含量、微生物量和土壤容重等土壤性质^[4-5]。冻融作用不但会导致土壤水热条件的改变, 影响植被的生存环境, 而且也会导致土壤结构的改变, 对土壤理化性质和生物特性产生深刻影响^[5-8]。土壤有机碳主要来源于植物、动物、微生物残体及其代谢产物, 其变化主要受初级生产量的输入过程与分解过程的制约, 受到温度和水分条件的深刻影

响, 从而造成不同环境条件下生态系统的土壤有机碳贮存量的差异。

1 土壤团聚体的形成与有机碳的关系

团聚体是由矿物颗粒和有机物等成分参与下, 有机质在微团聚体中纠缠, 尔后成为形成大团聚体的核, 并且在干湿冻融交替等自然物理过程作用下形成不同大小的多孔单元^[9]。土壤团聚体的形成受到矿物类型、金属氧化物以及干湿、冻融交替作用等非生物因素的控制。同时, 土壤中各种生物或生物来源有机质组分等生物因素, 包括根系、土壤动物、土壤微生物及其代谢产物, 也显著影响不同粒级土壤团聚体的形成和衍化^[10]。

土壤碳库组分与碳汇功能密切相关, 土壤有机碳库可分为非保护性碳库和保护性碳库, 非保护性和保护性碳库在自然条件和人为活动下可相互转化。保护性有机碳一般存在于土壤团聚体中, 团聚体有机碳组分的分配和稳定性对土壤有机碳的保持至关重要。土壤保护性组分是土壤碳汇功能增加的体现, 非保护性组分是碳汇减弱的体现^[11]。土壤非保护性有机碳库可用轻组有机碳或颗粒有机碳

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071056); 吉林省自然科学基金项目 (20101559)

作者简介: 王洋 (1970 年生) 男, 副研究员, 主要从事环境生态与生物地球化学研究。E-mail: wangyangw@neigae.ac.cn

***责任作者.** E-mail: liujingshuang@neigae.ac.cn

收稿日期: 2012-12-14

的组分变化特征来衡量^[12],因此,土壤碳库质量可通过轻组有机碳、颗粒有机碳、团聚体有机碳、微生物量碳等指标来表征,这些指标的变化可准确评价环境因子以及人为活动对土壤碳过程的影响。其中,大团聚体促使更多的有机碳贮存,但这种贮存是不稳定的、暂时的;而微团聚体促使有机碳能够长期固定,有机碳的稳定性随着土壤团聚体粒径的增大而减小。虽然大团聚体不能直接长期固持土壤有机碳,但能结合大量有机碳,并且通过有机质与土壤环境相互作用促进微团聚体的形成,从而为微团聚体对有机碳的长期固持提供了条件^[13-14]。土壤有机碳的稳定机制决定着土壤固定和储备有机碳的能力,土壤团聚体的稳定性及其有机碳的分布是反映团聚体对有机碳物理保护作用的关键。

2 冻融土壤理化性质对团聚体的影响

2.1 土壤物理性质的影响

冻融作用对土壤结构和水分分布特征具有明显影响^[15]。冻结时土壤孔隙中冰晶的膨胀打破了颗粒与颗粒之间的联结,通过冻融交替可降低土壤团聚体的水稳性,有效地将土壤大团聚体破碎成小团聚体。冻结对大团聚体的破坏程度大于小团聚体,而细颗粒物有向中等大小颗粒聚集的倾向,冻融作用也可导致表层土壤团聚体的稳定性增加^[16]。土壤水分在冻融过程中发生迁移而重新分布,冻融土壤体系中水分存在明显的“两段式”水盐运移规律,即冻结时土壤中的水和盐离子向表面冻层迁移;融化时,由于地表水分蒸发,土壤中的水和盐离子又向地表强烈迁移,这种水分运移作用受土壤类型、土壤含水量、溶液浓度、盐分组成以及冻结温度、冻结速度、冻结方向等因素影响^[17]。同时冰雪融化以及冰冻阻碍水的排放等因素造成融化后的土壤水分含量显著提高^[18]。随含水量的增大,冰夹层或缝隙也将增多,冻结过程中被冰分割成层状及网状的冻土,融化时水分可很快从冰融化的缝隙中排出,土壤释水性、渗透性相应提高^[19],冻融作用导致土壤孔隙度增大,团聚体组成发生改变。冻融的破坏作用随土壤含水量的增加而增强,当含水量超过饱和含水量后破坏作用开始下降^[20-21]。水分适宜条件下,随着冻融交替的频度和强度的增加,土壤比表面积逐渐增大,吸附作用增强,有利于保护土壤有机碳等养分。冻融作用对团聚体稳定性的影响还与土壤有机质的含量有关,有机质含量越高,团聚体的稳定性越大,而且土壤粘粒含量越多,团聚体稳定性越高^[5-6]。

2.2 土壤生物化学性质的影响

土壤含水量与温度是影响和调控土壤有机物质矿化率变化的重要因子。冻融作用通过影响土壤

温度变化速率、通气性以及水分和营养物质的迁移而影响微生物量及其活性^[22],在一定程度上可促进土壤有机质的矿化^[7]。土壤微生物量是有机质循环中最易变,最敏感的组成部分,冻融作用所产生的土壤扰乱可以杀死部分微生物而刺激残余微生物的活性,这些残余微生物将死的微生物细胞作为基质而使自身活性在某种程度上增强^[23],土壤微生物致死程度由于许多相关因素的存在而变得复杂,这些因素包括冻结速度、微生物生长阶段、胞外溶剂浓度与组成、冻融交替次数和土壤含水量等。

有机质和养分通过土壤团聚体破坏、交换点位暴露而变为有效养分,释放出结合的各种离子和结晶水等物质^[24],也可为残余微生物提供碳源与能量,促进微生物的活性,土壤有机质矿化分解增强,提高了土壤中可植物利用的养分浓度^[25-26]。通过微生物分解作用造成了不同级别的团聚体具有不同的稳定性,土壤大团聚体大部分是由细根和真菌丝连接的有机胶结,稳定性较低;而小团聚体是由不同的粘结剂包括持久的有机质,结晶氧化物和非晶形铝硅酸盐结合的,稳定性较强。冻融作用造成不同大小的团聚体相互转化,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。有机碳稳定性的变化主要体现在微生物对有机碳的矿化程度,也是土壤肥力高低、环境胁迫的重要指标。

3 冻融作用对土壤有机碳迁移转化的驱动作用

3.1 不同组分有机碳的迁移转化特征

土壤有机碳是动植物和微生物残体在各个阶段降解物质的混合物^[27],不同组分的混合物在土壤的物理、化学和生物过程中相互作用,形成具有不同稳定性的有机碳组分。根据碳库功能的不同,即依据不同周转时间、化学属性和库的大小将土壤有机碳库分为活性库、慢性库和惰性库^[28]。土壤活性有机碳库是指在一定的时空条件下,受植物和微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动比较快、不稳定、易分解和矿化,土壤活性碳库可通过轻组有机碳、可溶有机碳、颗粒有机碳和微生物量碳表征。

依据有机碳密度不同将土壤有机碳分为轻组有机碳与重组有机碳,轻组有机碳是土壤有机碳中易于分解的敏感部分,可反映外界环境因子变化和人为活动对土壤有机碳的影响^[29]。轻组有机碳是动植物形成腐殖质过程中所产生的有机碳,比全土有机碳周转速率快3~11倍,可代表中等分解速度的有机碳库^[30]。轻组土壤虽然只占土壤总量的1.8%~3.2%,但其碳含量是土壤有机碳总量的

15%~32%，是土壤微生物的重要碳源^[31]。可溶性有机碳含量的变化是由土壤中死掉微生物的分解、土壤中新的释放以及被矿化分解掉的可溶性有机碳量的相对多少综合作用的结果^[32]。经历冻融作用的土壤可溶性有机碳的存在为微生物活动提供碳源，以保持土壤微生物的活性，冻融初期土壤可溶性有机碳含量会显著增加。

土壤颗粒有机碳是指以较轻的自由态存在或被包裹在土壤颗粒中的较大的有机质颗粒(0.25~2 mm)。土壤颗粒有机碳主要来源于分解速度中等的植物残体分解产物，周转时间介于土壤有机碳活性库与惰性库之间，是反映生态过程对土壤有机碳库影响的敏感指标。颗粒有机碳具有生物与化学活性，对土壤团聚体的形成与稳定起着重要作用。土壤微生物量是指土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的生物个体总量，参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化，是土壤活性有机质中最活跃和最易变化的组分。冻融与干湿交替作用类似有杀菌的作用使土壤中微生物降低，降低微生物量碳的含量；同时土壤冻结时，冰晶快速生成，破坏微生物细胞结构，使其转变成微生物可利用态的有机碳，从而也会使微生物量碳含量下降。

3.2 团聚体稳定性对有机碳的影响

土壤团聚体是土壤有机碳储存的场所，团聚体的粒径不同，储存的有机碳组分和能力也不同。土壤有机碳的稳定是通过不同团聚体形成过程来实现的，团聚体粒径越小稳定性越强，所固持的有机碳周转时间越长^[33]。有机碳在土壤内的生物转化过程同时也是通过团聚作用进行自我保护的过程，土壤有机碳的含量水平通常与稳定性团聚体的数量密切相关。由于不同级别团聚体的胶结物质及作用强度不同，团聚体结合的有机碳受到物理保护程度也不同。在土壤团聚体不断的形成和破坏过程中，只有当团聚体的稳定性最大而周转速率最慢时其所含有的有机碳最稳定，小团聚体有机碳较大团聚体有机碳老化，微团聚体固碳作用比大团聚体的作用更大^[34-36]。

土壤大团聚体是微团聚体与不同阶段降解的残体相结合后形成的，有机碳也可能存在于团聚体外，而不与团聚体结合，基于此将土壤有机碳库分为游离碳库和团聚体碳库^[37-38]。团聚体内有机碳被稳定在团聚体中，受到团聚体的物理保护，而游离有机碳则是在团聚体之间，这两种碳库的转换可导致土壤有机碳存在稳定性的差异。团聚体碳库主要表现为颗粒有机碳含量，Golchin等^[39]将颗粒有机碳分为游离态与闭蓄态两个组分，闭蓄颗粒有机碳含量比游离的高，由于其在土壤母质中的位置不同导

致其功能不同，较高的烷基碳和较低的氧烷基碳表明闭蓄颗粒有机碳处于高度降解状态。大团聚体主要是通过闭蓄在团聚体中的富含碳水化合物的植物残体来联结的，微团聚体是通过闭蓄在大团聚体中颗粒有机碳联结形成的^[40]。对于温带地区不同级别团聚体不同位置上的有机碳受到物理保护程度的顺序是：粘砂粒结合的>微团聚体内的>大团聚体内而微团聚体外的>团聚体外游离的有机碳

由于团聚体中有机碳的分解需要足够的空气和水，当孔隙度较小时将直接阻碍碳的分解，同时也限制了土壤微生物对有机碳的接触，有机碳的分解只能依靠胞外酶扩散降解作用实现，从而有机碳的分解速度降低。土壤团聚体形成被认为是土壤碳固定的重要机制，特别是对土壤活性碳库具有物理保护作用^[13]，当土壤团聚体结构受到冻融作用时，有机碳库中各种形态的碳都会不同程度的暴露出来，随着土壤团聚体稳定性的逐渐破坏，团聚体包裹吸附的小分子有机质首先被释放出来，进一步增加土壤中可溶性有机碳的含量^[41-43]。土壤冻融过程中会发生膨胀与收缩现象，与土壤结合的具有大分子量的有机质中的氢键会发生断裂，释放出具有小分子量的有机质^[2]；有机碳含量高的土壤具有较好的土壤结构，土壤团聚体较稳定，被土壤团聚体包裹的有机碳逐步释放；有机碳含量较低的土壤团聚体较易解聚，冻融后土壤有机碳很快被释放出来^[32]。冻融过程中有机质的矿化作用增强，产生大量的 NO_3^- 和溶解性有机酸，同时土壤水分显著提高，养分易于溶出，或通过各种途径包裹在矿物颗粒内或吸附于土壤胶体表面随水迁移而流失，土壤酸性物质的释放加速了基性阳离子的活化和流失^[44-45]。

3.3 生物化学作用对团聚体有机碳的影响

土壤微生物对团聚体胶结形成的过程以及团聚体的稳定与分解具有非常重要的作用。不同大小的团聚体有机碳含量和微生物数量及种群差异也很大，从而导致不同团聚体的物质和能量循环转化的速度也存在显著差异，土壤微生物含量与微团聚体有机碳成反比关系^[46]。团聚体稳定性、孔隙度和水分含量显著影响土壤植物和微生物对活性碳组分的利用。通过改变土壤温度变化速率、通气性以及水分分布特征，冻融作用影响土壤微生物活性^[32]。冻结速度、冻融交替次数、土壤含水量和微生物不同生长阶段等造成土壤微生物的致死程度不同^[47]，影响微生物群落生理功能和群落结构^[48]。土壤中有有机碳等养分通过团聚体破碎、交换点位暴露，有机碳在不同结构的土壤团聚体中的重新分配，土壤有机碳和微生物的接触，可为土壤中的微生物提供碳源与能量，促进微生物活性，加快土壤

有机碳和植物残留物矿化分解速率^[49-50]。冻融土壤矿质态物质的增加可通过细菌等微生物的死亡,胞内物质渗出而变为有效养分,并刺激残余微生物的生长和活性,提高土壤中有机的矿化效率^[51],土壤中活性有机碳和可溶性有机碳含量明显增加,加速有机碳等养分的溶出。冻融作用初期对土壤有机碳的流失影响较大,但频繁的冻融循环可使得团聚体对有机碳的保护作用增强。

经历春季冻融作用的土壤呼吸作用明显增强,冻融期 CO₂ 排放量占全年土壤排放量的 3%~50%,冻融作用对土壤温室气体源汇的季节性转换起着重要作用^[52]。Schimel 等^[7]研究发现苔原土与泰加森林土在融化时会导致微生物初始呼吸的增加,冻融作用下,由于微生物呼吸作用而产生 CO₂ 的规律为,最大量产生于第一个冻融周期,在以后的周期中逐渐减少。随着冻融循环次数的增加,土壤微生物逐渐适应了这种变化,使得被冻融交替致死的微生物量减少,从土壤团聚体中释放出来的可溶性有机碳量下降,而土壤中原有的可溶性有机碳不断被存活的微生物利用分解,造成冻融交替使得土壤溶解性有机碳呈下降的趋势^[32]。相关研究也表明,随着冻融次数的增加,冻融作用对微生物量碳的影响逐渐减弱^[53]。冻融循环能转变微生物的代谢群落,夏季土壤微生物以细菌为主,冬季却转为真菌为主^[15, 54],真菌比细菌有较高的碳存储能力,表明经历冻融作用的土壤有利于有机碳储存,同时可释放一定量的可利用性有机碳^[55]。

有机碳是土壤肥力的重要物质基础,直接影响作物产量和有机碳累积,也是陆地生态系统中最大且周转时间最长的碳库,是大气 CO₂ 的源或汇,影响温室效应和全球气候变化,对陆地生态系统的组成、结构和功能产生深刻影响^[56]。土壤有机碳含量取决于其年形成量和分解量的相对大小,植物累积的有机碳不断输入,并经微生物分解转化形成新的土壤有机碳,同时原有土壤有机碳不断地被矿化分解,由有机碳输入及在土壤中的迁移转化过程形成了土壤有机碳的周转,这个过程受温度和水分等环境因子的显著影响^[57]。其中,土壤冻融、干湿交替等自然因素胁迫作用,与土壤有机碳的迁移转化及其与团聚体的形成、稳定性密不可分^[58]。

4 展望

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳储存库,土壤有机碳及其碳储存潜力的研究已成为全球变化、生态学及地球科学领域的前沿和热点问题之一。冻融作用对土壤理化性质和生物特性产生深刻影响,改变土壤团聚体的形成过程和有机碳的迁移转化,对土壤碳库的稳定性具有重要意义。土壤有

机碳是土壤团聚体的重要组成部分,是团聚体形成和保持稳定重要影响因素。不同土壤团聚体活性有机碳的变化都会对全球气候变化和碳循环产生深刻影响,而全球变暖将导致冻融环境发生变化进而影响土壤碳循环过程,冻融作用下土壤团聚体及其碳组分与土壤微生物活性等生物过程的耦合作用将进一步加深。因此,全球变暖背景下,冻土区冻融作用对土壤团聚体中有机碳的变化,尤其活性有机碳的含量、性质、周转等动态过程将会有助于对全球碳循环和平衡的认识。

参考文献:

- [1] 赵林,程国栋,丁永建. 中国冻土研究进展[J]. 地理学报: 英文版, 2004, 14(4): 411-416.
- [2] 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.
- [3] 孙辉,秦纪洪,吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. 土壤, 2008, 40(4): 505-509.
- [4] SABIN U, ANGIN I, KIZILOGLU F M. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99: 254-260.
- [5] LEHRSCHE 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: 1401-1406.
- [6] LEHRSCHE G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability [J]. *Soil Science*, 1998, 163: 63-70.
- [7] 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.
- [8] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 46-51.
- [9] DEXTER A R. Advances in characterization of soil structure [J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11: 199-238.
- [10] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 96-99.
- [11] 吴建国,张小全,徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 65-71, 77.
- [12] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155-176.
- [13] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099-2103.
- [14] 刘满强,胡峰,陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2642-2650.
- [15] HENRY H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: trends, methodological weakness and suggested improvements [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 977-986.
- [16] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes

- on soil aggregate stability [J]. *Catena*, 2003, 52: 1-8.
- [17] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(6): 14-18.
- [18] 龚家栋, 祁旭升, 谢忠奎, 等. 季节性冻融对土壤水分的作用及其在农业生产中的意义[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 328-333.
- [19] 腾凯, 柳宝田, 李益新, 等. 季节性冻土区地下水的变化规律及开发利用[J]. *地下水*, 1996, 18(1): 35-37.
- [20] TASKIN O, FERHAN F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. *Catena*, 2003, 52: 1-8.
- [21] 王凤, 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.
- [22] JARVIS S C, STOCKDALE E A, SHEPHERD M A, et al. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soil: Process and measurement [J]. *Advances in Agronomy*, 1996, 57: 187-235.
- [23] APPEL T. Non-biomass soil organic N — the substrate for N mineralization flushes following soil drying rewetting and for organic N rendered CaCl₂-extratable upon soil drying [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(10/11): 1445-1456.
- [24] VAN BOCHOVE, JONES E H G, PREVOST D. Winter fluxes of greenhouse gases from snow-covered agricultural soil: Intra-annual and inter-annual variations [J]. *Global Biogeochemistry*, 2000, 14: 1-113.
- [25] BROOKS P D, WILLIAMS M W, SCHMIDT S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt [J]. *Biogeochemistry*, 1998, 43: 1-15.
- [26] TEEPE R, BRUMME R, BEESE F. Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1807-1810.
- [27] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-328.
- [28] SMITH P, SMITH J U, POWLSON D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments [J]. *Geoderma*, 1997, 81: 153-225.
- [29] TAN Z, LAL R, OWENS L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92: 53-59.
- [30] BAISDEN W, AMUNDSON R, COOK A C, et al. Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16: 1117-1132.
- [31] 武天云, JEFF J S, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- [32] 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.
- [33] CHENU C, PLANTE A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex' [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 596-607.
- [34] PUGET P, LAL R, IZAUMALDE C, et al. Stock and distribution of total and corn derived soil organic carbon in aggregate and primary particle fractions for different land use and soil management practices [J]. *Soil Science*, 2005, 170(4): 256-279.
- [35] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-709.
- [36] 魏小波, 何文清, 黎晓峰, 等. 农田土壤有机碳固定机制及其影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 487-494.
- [37] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1998, 62: 1367-1377.
- [38] SHI Y, CHEN X, SHEN S M. Light fraction carbon and water-stable aggregates in black soils [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 97-100.
- [39] GOLCHIN A, OADES J M, SKEJMSTAD J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid-state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 285-309.
- [40] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1996, 28: 656-676.
- [41] 李忠佩, 张桃林. 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.
- [42] 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.
- [43] BECHMANN M E, KLEINMAN P J A, SHARPLEY A N, et al. Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 2301-2309.
- [44] WILLIAMS M W, LOSLEBEN M, CAINE N, et al. Change in climate and hydro-chemical responses in a high-elevation catchments in the Rocky Mountains, USA [J]. *Limnology Oceanogr*, 1996, 41: 939-946.
- [45] 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.
- [46] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7-31.
- [47] WALKER V K, PALMER G R, VOORDOUW G. Freeze-thaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72: 1784-1792.
- [48] WILLIAMS M A, RICE C W. Seven years of enhanced water availability influences the physiological, structural, and functional attributes of a soil microbial community [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 535-545.
- [49] SCHIMEL J P, MIKAN C. Changing microbial substrate use in Arctic tundra soils through a freeze-thaw cycle [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1411-1418.
- [50] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 等. 冻融作用下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.
- [51] 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: 1785-1795.
- [52] 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: 2027-2037.
- [53] 魏丽红. 冻融作用对土壤理化以及生物学性质的影响综述[J]. 安

- 徽农业科学, 2009, 37(11): 5054-5057.
- [54] SHARMA S, SZELE Z, SCHILLING R, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72: 2148-2154.
- [55] MANNISTO M K, TIROLA M, HAGGBLOM M M. Effect of freeze-thaw cycles on bacterial communities of arctic tundra soil [J]. *Soil Microbiology*, 2009, 58: 621-631.
- [56] 赵鑫, 宇万太, 李建东. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2203-2209.
- [57] FANG C M, SMITH P, MONCRIEFF J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, 433(7021): 57-59.
- [58] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48: 34-43.

The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon

WANG Yang, LIU Jingshuang*, WANG Quanying

Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: Aggregate is the basic composition unit of soil structure. Under the actions of soil microbes, and the natural processes such as dry-wet, freeze-thaw cycles, the mineral particles, organic matters and other ingredients can form soil aggregates of different sizes. The stable mechanism of soil organic carbon determines the ability of organic carbon store and preserving in soil aggregates, and the soil aggregate stability and its organic carbon contents reflect the aggregate physical protection to organic carbon. The alternating contraction and expansion caused by freeze-thaw cycles can change soil aggregate structure and composition, which obviously affect the soil structure and water distribution and reduce soil aggregate water stability. Freeze-thaw cycles can influence the microbial quantity and its activity by variations of soil temperature change rate, air permeability, moisture and nutrient transfer, and therefore improve the soil organic carbon and plant residues migration and transformation. The content of soil labile organic carbon will increase significantly at the initial stages of freeze-thaw processes. Various forms of organic carbon in soil aggregates affected by the freeze-thaw cycles can be exposed in different degrees, and organic carbon in different aggregates would redistribute, which influence soil organic carbon source/sink strength. With the significantly higher soil moisture caused by freeze-thaw processes, soil organic carbon and other nutrient can be easily dissolved, or migrate through wrapping up in the mineral particles or adsorbing on the soil colloid surface. The soil organic carbon release more at the early freeze-thaw stages, but the preservation of organic carbon in soil may be enhanced by the frequent freeze-thaw cycles.

Key words: freeze-thaw cycles; environmental effect; aggregate; organic carbon