

# 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤氮素的影响

张海欧<sup>1,2</sup>, 韩霁昌<sup>1</sup>, 张 扬<sup>1</sup>, 孙婴婴<sup>1</sup>, 王欢元<sup>1</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司 陕西省土地整治工程技术研究中心 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** [目的] 探讨冻融作用对毛乌素沙地陕北榆林地区砒砂岩与沙复配土壤氮素的影响, 对于提升毛乌素沙地土壤肥力具有重要作用。[方法] 通过室内培养试验, 探讨不同比例砒砂岩与沙复配土壤氮矿化过程对冻融的响应特征。[结果] 冻融交替作用对土壤氮的矿化有显著影响, 在冻融 1 周期时, 3 种比例复配土壤中硝态氮、铵态氮含量增加较快。在冻融 2 周期后, 复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均出现下降趋势。冻融 5 周期, 复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均开始呈现稳定增加趋势。冻融 10 周期后, 1:1, 1:2 及 1:5 复配土壤铵态氮含量分别增加了 10%, 49% 与 11%, 硝态氮含量分别增加了 14%, 39% 与 34%, 其中 1:2 复配土硝态氮、铵态氮含量较 1:1, 1:5 增加显著, 对氮素的保持性能较好。[结论] 冻融循环促进了土壤有机氮的矿化, 有利于土壤中硝态氮、铵态氮的累积, 为早春农作物的生长提供足够的氮素。

**关键词:** 砒砂岩; 冻融作用; 复配土壤; 硝态氮; 铵态氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0022-06

中图分类号: S152.4, S158.5

**文献参数:** 张海欧, 韩霁昌, 张 扬, 等. 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤氮素的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 22-27. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.004; Zhang Haiou, Han Jichang, Zhang Yang, et al. Effects of freezing and thawing cycles on soil nitrogen of fieldspathic sandstone and sand compound soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 22-27. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.004

## Effects of Freezing and Thawing Cycles on Soil Nitrogen of Fieldspathic Sandstone and Sand Compound Soil

ZHANG Haiou<sup>1,2</sup>, HAN Jichang<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, SUN Yingying<sup>1</sup>, WANG Huanyuan<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of freezing and thawing Cycles on nitrogen in fieldspathic sandstone and sand compound soil were examined in Yulin area of Northern Shaanxi Province, which was expected to improve soil fertility in Mu Us sandy land. [Methods] This paper studied the response of nitrogen mineralization processes in different mixed proportions of fieldspathic sandstone and sand compound soil to freezing and thawing by indoor culture experiment feature. [Results] The alternation of freezing and thawing had a significant effect on the mineralization of soil nitrogen, and the contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in three proportions of soils increased rapidly during the first cycle of freezing and thawing. After 2 cycles of freezing and thawing, the contents of nitrate and ammonium in compound soil decreased. In the period of 5 cycles of freezing and thawing, the contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in

收稿日期: 2017-04-07

修回日期: 2017-05-05

资助项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目“退化及未利用土地整治创新团队”(2016KCT-23)

第一作者: 张海欧(1985—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: 279569951@qq.com。

通讯作者: 王欢元(1981—), 男(汉族), 甘肃省民勤县人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土资源管理、土壤作物系统模拟以及土地工程等研究工作。E-mail: 181073033@qq.com。

compound soil all began to show stable increasing trend. After 10 cycles of freezing and thawing, the contents of ammonium nitrogen in 1 : 1, 1 : 2 and 1 : 5 compound soil increased by 10%, 49% and 11% respectively, and the contents of nitrate nitrogen increased by 14%, 39% and 34%. Especially, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents the 1 : 2 compound soil were promoted significantly against the ones of 1 : 1, 1 : 5 compound soils, it performed better in nitrogen conservation. [Conclusion] Freezing and thawing cycles promoted the mineralization of soil organic nitrogen, which was beneficial to the accumulation of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil, which can provide sufficient nitrogen for the growth of crops in early spring.

**Keywords:** fieldspathic sandstone; freezing-thawing cycles; compound soil; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen

气候条件是自然因素影响地域生态系统功能的重要因素<sup>[1]</sup>。冻融交替作为中国中、高纬度及高海拔地区重要的气候驱动因子,通过影响土壤理化性质和生物学性状进而影响土壤氮素转化过程,特别是在以土壤微生物为媒介的土壤元素循环(硝化作用、有机质矿化、腐殖质分解)等方面<sup>[2]</sup>。氮是植物生长的必需元素,土壤中的氮包括有机氮和无机氮两大类,前者占了 95% 以上,部分可溶性有机氮可被植物直接吸收,但在大多数情况下,有机氮只有被转化为无机氮后才能被植物有效利用<sup>[3]</sup>。氮矿化过程是缓效态氮转化为有效态氮的起始过程,这对于土壤氮素迁移转化乃至整个生态系统的氮循环均十分重要。氮矿化是指将有机态氮转变成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的过程(囊括了氨化和硝化 2 个过程),即净氮矿化过程。通常通过测定一定时间内土壤无机氮的变化量来估算净氮矿化量(速率),这一指标能较好地反映出土壤有效氮的状态<sup>[4]</sup>。土壤氮素通常被认为是最易耗竭和限制植物生长的营养元素之一<sup>[5]</sup>。氮矿化所产生的  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  是土壤和一些植物所需氮素的主要来源<sup>[6]</sup>。在毛乌素沙地砒砂岩与沙是两种相对独立的自然存在,是引起水土流失和土地沙漠化的主要因素,也被当地并称为“两害”。陕西省土地工程建设集团在毛乌素沙地土地综合整治工程中将砒砂岩与沙合成“土壤”,其兼具砒砂岩和沙的性质,形成了良好的质地结构,具有良好的保水和保肥性,为作物的生长需求创造了基本条件,这对于扩充后备耕地资源,保障中国  $1.20 \times 10^8 \text{ hm}^2$  耕地红线和粮食生产安全具有重要意义。目前,有关砒砂岩与风沙土复配土壤的特性、养分情况、作物产量等研究已取得了一定进展<sup>[7-9]</sup>,国内外有关冻融交替作用对土壤物理性质、营养元素的影响也有大量研究<sup>[10-12]</sup>,但有关冻融过程对砒砂岩与沙复配土壤氮素的影响研究甚少。本文通过室内培养试验,以受季节性冻融过程影响显著的毛乌素沙地陕北榆林地区砒砂岩与沙复配土为研究对

象,探讨不同比例砒砂岩与沙复配土壤氮矿化过程对冻融的响应特征,对于提升毛乌素沙地土壤肥力具有重要作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

样品取自毛乌素沙地榆林市榆阳区小纪汗乡大纪汗村。榆阳区( $109^\circ 28' 58''$ — $109^\circ 30' 10''\text{E}$ ,  $38^\circ 27' 53''$ — $38^\circ 28' 23''\text{N}$ )位于陕西北部,海拔 1 206~1 215 m,毛乌素沙漠南缘,无定河中游。榆阳区属典型中温带半干旱大陆性季风气候区,降水时空分布不匀,气候干燥,冬长夏短,四季分明,日照充足,春季多风干旱,秋季温凉湿润。年均温  $6.0 \sim 8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$  积温  $3\ 307.5 \text{ }^\circ\text{C}$  且持续天数为 168 d。年平均无霜期 154 d,1 月均温  $-12 \sim -9.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,每年 11 月气温进入  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,第二年 3 月气温逐渐恢复到  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,长达 4~5 个月的冻结期,在秋末和春初季节里土壤处于冻结和解冻状态。陕北地区年平均降水量 413.9 mm,年极端降雨最大 695.4 mm(1964 年),最小 159.6 mm(1965 年),60.9% 降雨集中在 7—9 这 3 个月,雨热同期。年平均日照时数 2 879 h,日照百分率 65%,年总辐射量  $145.2 \text{ kJ/cm}^2$ 。砒砂岩和沙在项目区是相间分布的,土壤类型主要以风沙土为主,全氮含量 0.075%,全磷含量 0.63 g/kg,全钾含量 26.51 g/kg,有机质含量 0.03%。

### 1.2 研究方法

2014 年 10 月中旬,在毛乌素沙地陕西榆林市榆阳区的小纪汗乡采集试验所用土壤样品,采样点位于陕西省土地工程建设集团建设的大田试验小区。试验地为  $15 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  的小区,在考虑混合复配土壤的混合比例时,将小区平均分为 3 个  $5 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  的次小区,分别考虑了 1 : 1, 1 : 2, 1 : 5 等 3 个混合比例,每个小区只是在表层 30 cm 覆盖了不同混合比例的复合土壤(砒砂岩尽量粉碎,最好直径在 4 cm 以下,

保证表层砒砂岩与沙按比例均匀混合覆盖), 30 cm 以下为当地沙土。分别采集 1:1, 1:2, 1:5 小区的 0—20 cm 表层土壤, 将采集的土壤立即放入冷藏箱, 然后带回实验室用于做培养试验。同时采集当地灌溉用水, 对试验样品进行水分校正备用。3 种比例复配土壤及原始沙土的主要理化性质详见表 1。以 4 种比例复配土壤为培养介质, 每一比例的复配土样品准备 5 份, 每份 500 g, 分别装入 20 个圆形铝盒中, 为了使室内冻融条件更接近于自然状态, 即温度波动尽可能从表层土壤开始, 在铝盒外面包置石棉网以达到较好的绝缘效果。比例 1 土样记为  $M_0, M_1, M_2, M_5, M_{10}$ , 比例 2 土样记为  $A_0, A_1, A_2, A_5, A_{10}$ , 比例 3 土样记为  $S_0, S_1, S_2, S_5, S_{10}$ , 比例 4 土样品  $H_0, H_1, H_2$ ,

$H_5, H_{10}$ 。  $M_0, A_0, S_0$  和  $H_0$  为对照样品, 不做冻融处理。为了模拟土壤冻融的实际情况, 对土壤样品含水量进行水分校正, 调节土壤含水量达最大田间持水量的 60%, 试验过程中不断补充失去的水分, 保持试验土壤样品相应的水分条件。将土壤在  $-15 \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下完全冻结 1 d, 然后在室温条件下放置 1 d, 此为 1 个冻融周期。每一个比例的 5 份样品, 设置 3 次重复, 分别用于测定其冻融前、1 周期、2 周期、5 周期、10 周期的土壤硝态氮、铵态氮含量。试验前用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提(水土比为 5:1), 用全自动间断化学分析仪(cleverchem 200, 德国)测定硝态氮和铵态氮的含量, 同时用烘干法测土壤质量含水量。

表 1 砒砂岩与沙复配土壤主要理化性质

砒砂岩:沙	土层深度/cm	粒径组成/%			质地	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
		砂粒	粉粒	黏粒				
1:1	0—30	53.82	38.12	8.06	壤土	1.37	0.44	2.26
1:2	0—30	68.86	26.01	5.13	砂壤	1.52	0.54	2.61
1:5	0—30	79.03	17.35	3.62	砂壤	1.56	0.65	2.97
0:1	30—140	95.00	4.15	0.85	砂土	1.61	0.75	3.32

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 统计分析软件进行 T 检验。对试验数据进行整理和绘图分别采用 Excel 2007 和 SigmaPlot 12。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤硝态氮的影响

冻融交替作用对复配土壤硝态氮含量产生极显著影响( $p < 0.001$ ), 不同冻融交替过程中土壤硝态氮含量变化特征如图 1 所示。由图 1 可知, 随着冻融周期的增加, 硝态氮的含量呈现先增加后减小再稳定增加的趋势。冻融循环初期复配土壤硝态氮含量呈现随冻融循环周期增加而增加的趋势, 冻融 1 周期时, 增加最为明显, 达到峰值, 与冻融处理前相比, 1:1, 1:2 及 1:5 复配土壤硝态氮含量分别为冻融处理前的 1.30, 1.52 及 1.49 倍。在冻融 2 周期后, 3 种比例复配土壤硝态氮含量开始下降, 并达到最小值。冻融 5 周期后, 各处理整体上均呈现升高趋势, 其中, 1:5 复配土壤的硝态氮含量增加速率较快。随冻融循环周期的增加, 3 种比例复配土壤硝态氮含量的分布有所变化, 冻融前和冻融初期 3 种比例复配土壤硝态氮含量表现为: 1:2 > 1:1 > 1:5。冻融 5 周期后, 3 种比例复配土壤硝态氮含量表现为: 1:2 > 1:5 > 1:1。这是由于不同土壤类型其矿化作用速度也不

同, 由表 1 可知, 随着沙含量增加, 1:1, 1:2 及 1:5 复配土壤质地类型呈现从壤土—砂壤—砂壤的变化趋势, 而砂土中土壤有机质的矿化和植物残留物的降解比黏土中快, 土壤冻融交替对有机质矿化作用的影响主要表现为土壤有机氮和碳矿化作用的增强。较冻融之前, 冻融 10 周期后, 1:1, 1:2 及 1:5 复配土壤硝态氮含量分别增加了 14%, 39% 与 34%, 其中 1:2 复配土壤硝态氮含量增加趋势较为显著。

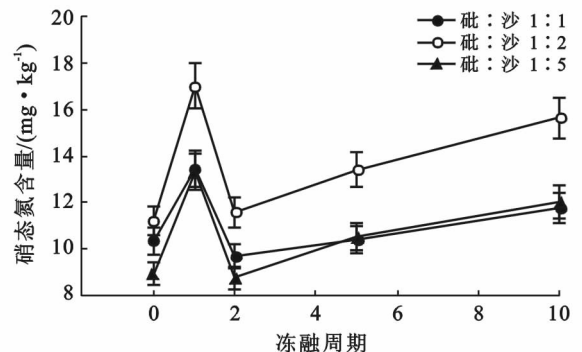


图 1 不同冻融交替过程中土壤硝态氮含量变化特征

### 2.2 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤铵态氮的影响

图 2 是冻融交替过程中不同比例复配土壤的铵态氮含量变化特征。冻融交替作用对复配土壤铵态氮含量产生极显著影响( $p < 0.001$ )。随着冻融周期的增加, 不同比例复配土壤铵态氮的含量呈现先增加

后减小随后稳定增加的趋势。冻融1周期后,1:1,1:2及1:5复配土壤铵态氮含量都显著增加,达到峰值,分别为冻融处理前的1.41,1.64及1.44倍。表明冻融交替初期,剧烈的冻结温度显著增加了复配土壤中的铵态氮含量。冻融2周期后,3种比例复配土壤铵态氮含量开始下降,并达到最小值,其后含量开始增加,且变化不大,呈缓慢增加趋势。表明冻融后期,冻融循环周期的增加影响铵态氮的含量。随冻融循环周期的增加,3种比例复配土壤铵态氮含量的分布有所变化,冻融前和冻融初期3种比例复配土壤铵态氮含量表现为1:5>1:2>1:1。冻融5周期后,3种比例复配土壤铵态氮含量表现为1:2>1:5>1:1。较冻融之前,冻融10周期后,1:1,1:2及1:5复配土壤铵态氮含量分别增加了10%,49%与11%,其中1:2复配土壤铵态氮含量增加速率显著。

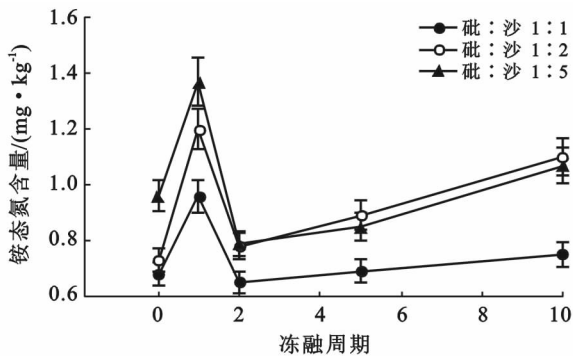


图2 不同冻融交替过程中土壤铵态氮含量变化特征

### 3 讨论

本研究发现在冻融1周期后,3种比例复配土壤铵态氮和硝态氮含量均显著增加,其含量的增加可能是由于冻融循环作用导致凋落物或土壤腐殖质的破碎,从而加速了土壤氮矿化过程。冻融循环过程中复配土壤中铵态氮含量增加可能是由于冻融交替作用使复配土壤的物理结构发生改变,导致土壤产生的交替收缩和膨胀,从而引起土壤晶格的开放,释放出固定的铵;除上述原因外,冻融循环过程中复配土壤铵态氮含量的增加还可能是由于冻融作用使土壤微粒对铵态氮的吸附减少造成的<sup>[13]</sup>。Freppaz等<sup>[14]</sup>在其研究中推断,冻融循环过程中,铵态氮含量的增加可能与冻融导致的解附有关。

在冻融2周期后,1:1,1:2,1:5复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均出现下降趋势。主要有几方面原因:(1)室内模拟过程中,复配土壤中硝态氮、铵态氮被残存的少量的植物根系的利用。(2)被复配土壤中存活或新生的微生物所固持,尤其是在温和的冻融

交替作用下,微生物有很强的抗性。(3)在室内模拟的冻融试验过程中,复配土壤渗透液中无机氮的流失。(4)在冻融2周期后,复配土壤中气态氮的损失也可能导致土壤中铵态氮含量的下降。

从冻融循环5周期开始,1:1,1:2,1:5复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均开始呈现稳定增加趋势。表明,长期冻融循环作用能够增加土壤中硝态氮和铵态氮含量,此结论与有关学者研究<sup>[15]</sup>相似,其认为多次冻融循环作用能够使土壤中硝态氮、铵态氮含量增加。冻融循环10周期后,1:1,1:2及1:5复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均增加了,硝态氮含量分别增加了14%,39%与34%,铵态氮含量分别增加了10%,49%与11%,其中1:2复配土壤硝态氮、铵态氮含量增加速率均显著,这可能是1:2复配比例下土壤的水分、质地、导热性和通气性等因素共同作用的结果。有关研究<sup>[16]</sup>表明,1:2复配比例下,在玉米苗期和收获期,土体中的氮素累积量最高,且玉米产量最高,可供玉米吸收的氮素最多。以上结果说明,冻融交替作用下混合比例为1:2复配土氮素矿化速率较快,硝态氮、铵态氮含量较1:1,1:5增加显著,1:2复配土对氮素的保持性能最好,因此,混合比例为1:2的复配土可在工程上推广应用。

氮矿化速率一直是影响中、高纬度地区植物生长的重要因素<sup>[17]</sup>。冻融交替作用对不同比例复配土壤氮的矿化有显著影响,冻融有利于3种比例复配土壤中硝态氮、铵态氮含量的增加。随着冻融循环周期的增加,复配土壤中硝态氮、铵态氮质量分数增加(图1—2)。在冻融1周期时,复配土壤中硝态氮、铵态氮含量增加比较快,表明短期的冻融交替作用有利于不同比例复配土壤氮素的转化,随着冻融循环周期的增加净矿化速率逐渐降低。这主要是由于在室内模拟过程中排除了降雨的淋溶和植物的吸收,复配土壤中氮素矿化量积累,使得土壤有机氮的进一步矿化受到抑制,从而使得土壤矿化量增加缓慢或降低<sup>[18]</sup>。短期的冻融循环作用会促进微生物释放大量的有机和无机物质,而长期的冻融循环作用会降低微生物分解有机质的能力<sup>[19]</sup>。冻融循环作用短期内虽然使土壤呼吸提高,土壤活性碳的损失加剧<sup>[20-21]</sup>。但土壤活性碳的减少,可能促进冻融循环过程中土壤矿化氮的增加<sup>[22]</sup>,因此,随着冻融循环周期的增加不同比例复配土壤有机氮的矿化量持续增加,复配土壤中硝态氮、铵态氮含量增加。

以上结果说明毛乌素沙地榆林地区土壤在秋末和春初的冻融期间,土壤中氮的矿化过程仍在进行。冻融循环过程能够促进复配土壤中硝态氮、铵态氮含

量的增加,是由于冻融对复配土壤氮矿化作用产生影响,冻融循环过程能够导致部分微生物死亡,死亡微生物细胞破裂后,复配土壤中的部分硝态氮、铵态氮直接来源于微生物的释放;另一方面,由于一些微生物能够适应低温下生存,当温度升高冻结的土壤融化时,残留的微生物利用死亡微生物提供的足够基质,刺激了微生物活性,从而有利于复配土壤有机氮的矿化过程,可能促进冻融循环过程中复配土壤硝态氮、铵态氮含量的增加。Freppaz 等<sup>[14,23]</sup>研究表明,土壤中矿质氮与团聚体吸附的有机质也有关,冻融循环过程可能导致土壤中以前不可利用的有机和无机胶体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的释放。徐俊俊<sup>[13]</sup> 研究发现,冻融循环过程中土壤团聚体的破坏使得土壤中可提取的有机物质和矿质态氮的增加。

## 4 结论

本研究发现在冻融 1 周期后,1:1,1:2 及 1:5 复配土壤硝态氮和铵态氮含量均显著增加,达到峰值。在冻融 2 周期后,3 种比例复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均出现下降趋势,并达到最小值。从冻融循环 5 周期后开始,复配土壤中硝态氮、铵态氮含量均开始呈现稳定增加趋势。冻融循环 10 周期后,1:1,1:2 及 1:5 复配土壤铵态氮含量分别增加了 10%,49% 与 11%,硝态氮含量分别增加了 14%,39% 与 34%,其中 1:2 复配土壤硝态氮、铵态氮含量增加速率较 1:1,1:5 显著,1:2 复配土对氮素的保持性能最好,因此,混合比例为 1:2 的复配土可在研究区推广应用。短期的冻融交替作用显著增加了 1:1,1:2 及 1:5 复配土壤中的氮矿化累积量。而多次的冻融交替作用复配土壤有机氮的矿化量持续增加,硝态氮、铵态氮含量呈现增加的趋势。

在冻融循环作用下,土壤中的硝态氮、铵态氮含量是增加还是减少,随研究的地区不同和研究的模式不同得出的结果不尽相同。一些学者<sup>[13,24]</sup> 认为冻融交替增加了土壤中硝态氮和铵态氮的含量,增加了土壤中总可溶性氮、可溶性有机氮和净矿化速率。而魏丽红<sup>[25]</sup> 在研究冻融交替作用对黑土的影响中发现,冻融作用使土壤的硝态氮含量反而降低了。这可能与供试研究的土壤中硝化细菌的数量多少以及土壤母质不同有关,本研究结果发现冻融交替过程中土壤中硝态氮的含量增加。这可能是由于冻融交替作用使土壤中的硝化底物增加,刺激了土壤中硝酸还原酶的活性,从而增加了硝态氮的含量。

中国毛乌素沙地陕北榆林地区,由于秋末或春初气温的昼夜变化较大,表层土壤会发生日冻融过程,

在冻结温度和冻融次数差不多的前提下,虽然秋末和春初的降水量都较少,但是由于秋季土壤含水量较低,而春季地表积雪融化,土壤含水量达到过饱和状态,此时土壤中无机氮质量分数的增加,有利于为早春农作物的生长提供大量的营养物质。本文研究冻融交替作用下土壤氮素的变化规律,为提升毛乌素沙地土壤肥力具有重要作用。

以上的认识仅是从室内模拟试验上来分析的,还是初步的,冻融交替作用对砒砂岩与沙复配土壤氮素的影响更准确的理解尚需野外试验观测和室内模拟相结合的试验数据来支持。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郭银燕. 农业与全球变暖[J]. 农业环境保护, 1995, 14(4): 181-182.
- [2] 朴河春, 刘广深, 洪业汤. 非生物应力对土壤性质的影响[J]. 土壤肥料, 1998(3): 17-21.
- [3] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1032-1042.
- [4] Christopher S F, Shibata H, Ozawa M, et al. The effect of soil freezing on N cycling: Comparison of two headwater subcatchments with different vegetation and snowpack conditions in the northern Hokkaido Island of Japan[J]. Biogeochemistry, 2008, 88(1): 15-30.
- [5] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126-133.
- [6] 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, 4(12): 505-508.
- [7] Han Jichang, Xie Jiancang, Zhang Yang. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, Northwest China[J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 550-555.
- [8] 付佩, 王欢元, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土造田技术研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 242-246.
- [9] 张露, 韩雾昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 207-214.
- [10] 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(2): 251-238.
- [11] 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(3): 2148-2154.
- [12] 常宗强, 马亚丽, 刘蔚, 等. 土壤冻融过程对祁连山森林

- 土壤碳氮的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 200-206.
- [13] 徐俊俊. 冻融交替对高寒草甸土壤氮素的影响[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2010.
- [14] Freppaz M, Williams BL, Edwards A C, et al. Simulating soil freezing and thawing cycles typical of winter alpine conditions; Implications for N and P availability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 35(1): 247-255.
- [15] Herrmann A, Witter E. Source of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soil[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2002, 34(10): 1495-1505.
- [16] 罗林涛, 程杰, 王欢元, 等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 59-66.
- [17] 贾国晶, 周永斌, 代力民, 等. 冻融对长白山森林土壤碳氮矿化的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 624-628.
- [18] Amador JA, Gorres JH, Savin MC. 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.
- [19] Koponen H T, Flojt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: A laboratory microcosm study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 757-766.
- [20] Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO<sub>2</sub> production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 263-272.
- [21] Fan Jihui, Cao Yingzi, Yan Yan, et al. Freezing-thawing cycles effect on the water soluble organic carbon, nitrogen and microbial biomass of alpine grassland soil in Northern Tibet [J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, 6(3): 562-567.
- [22] Neilsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1723-1730.
- [23] 张海欧, 韩霁昌, 张扬, 等. 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤团粒结构的影响[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 186-191.
- [24] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究进展[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 1032-1042.
- [25] 魏丽红. 冻融交替对黑土土壤有机质及氮钾养分的影响[D]. 吉林 长春: 吉林农业大学, 2004.
- ~~~~~
- (上接第 21 页)
- [13] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 胡杨光合蒸腾与影响因素间关系的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(4): 155-159.
- [14] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4-6.
- [15] Filippo S, Anna M D T, Mario F, et al. Economic assessment of *Eucalyptus* (spp.) for biomass production as alternative crop in Southern Italy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 614-619.
- [16] Laurel K D, Aiko U, Wu X Q, et al. Effect of transpiration on plant accumulation and translocation of PPCP/EDCs [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 198: 144-153.
- [17] Remko A D, Craig V M B, YAN S L, et al. The peaked response of transpiration rate to vapour pressure deficit in field conditions can be explained by the temperature optimum of photosynthesis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190(6): 2-10.
- [18] Timothy M B, Ian J C, Mark A A. Hydraulic traits and water use of *Eucalyptus* on restored versus natural sites in a seasonally dry forest in Southwestern Australia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 274(24): 58-66.
- [19] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 等. 广西典型水库集水区巨尾桉和马尾松蒸腾作用 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 576-583.
- [20] 孙艳, 王益权, 徐伟君, 等. 紧实胁迫对土壤呼吸强度及黄瓜生长和品质的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1128-1134.
- [21] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子 [J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [22] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 广西岩溶区不同植被类型土壤水分特征及影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 22-27.