

冻融对河北省深州市盐碱地土壤理化性质的影响

赵恒策, 魏霞, 贺燕, 王涛

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 随着全球气候变暖, 冻融对土壤性质的影响日益受到重视。以河北省深州市盐碱土为研究对象, 通过分析土壤含水率、全持水量、容重、饱和导水率、电导率、pH 和有机质的变化, 探讨冻融对 0—20 cm 深度盐碱地土壤理化性质的影响。结果表明: 0—20 cm 土层深度, 冻融增加土壤的含水率, 而对全持水量的影响较小; 0—10 cm 土层深度, 冻融增加了土壤容重与 pH, 降低了土壤的电导率和渗透性, 该层土壤水盐迁移呈特殊规律, 土壤含水率与电导率呈相反变化趋势; 对于 10—20 cm 土层深度, 冻融增加了土壤的渗透性和有机质的含量。在相关性分析中, 0—20 cm 土层深度土壤容重与全持水量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与含水率呈显著负相关 ($P < 0.05$), 其有机质含量和导水率与其他性质无显著相关; 0—10 cm 土层深度土壤 pH 与容重和含水率呈极显著相关, 与全持水量呈显著相关; 10—20 cm 土层深度土壤电导率与容重呈显著负相关, 与全持水量呈显著正相关。研究结果为冻融对盐碱土影响的研究及盐碱土的改良提供科学依据。

关键词: 冻融; 盐碱地; 土壤; 理化性质

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0078-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.013

Effects of Freeze-thaw on the Physical and Chemical Properties of Saline and Alkali Soil at Shenzhou City, Hebei Province

ZHAO Hengce, WEI Xia, HE Yan, WANG Tao

(College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: With global warming, the effects of freeze-thaw on soil properties have been increasingly emphasize. Taking saline and alkali soil in Shenzhou city of Hebei province as research object, the impacts of freeze-thaw on the physical and chemical properties of 0—20 cm deep saline and alkali soil were investigated by analyzing the changes of soil water content, water-holding capacity, bulk density, saturated hydraulic conductivity, electrical conductivity, pH and organic matter content. The results showed that freeze-thaw increased moisture content of the soil in 0—20 cm depth but had no apparent effect on water-holding capacity. For the 0—10 cm deep, freeze-thaw increased soil bulk density and pH, but reduced the electrical conductivity and permeability. The water and salt migration of the soil in this layer was special, the soil moisture content and conductivity showed the opposite trend. For the 10—20 cm deep, freeze-thaw increased soil permeability and organic matter content. Soil bulk density was very significantly negatively correlated with the water-holding capacity ($P < 0.01$), and significantly negatively correlated with soil moisture content ($P < 0.05$) in the 0—20 cm deep soil. The organic matter and saturated hydraulic conductivity had no significant correlation with other properties. The pH had very significant correlation with soil bulk density and moisture content, and it had significant correlation with water-holding capacity in the 0—10 cm deep soil. There were significant negative correlation between electrical conductivity and soil bulk density, and a significant positive correlation between electrical conductivity and water-holding capacity in 10—20 cm deep soil. These results will provide a scientific basis for the study of the influence of freeze-thaw on saline-alkali soil and the improvement of saline-alkali soil.

Keywords: freeze-thaw; saline and alkali soil; soil; physical and chemical properties

冻融是指日、年和多年发生在高海拔、中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内的环境介质冻结和融化^[1]。随着全球气候变暖,冻融对土壤性质的影响受到越来越多的关注^[2]。在我国 75% 以上的国土面积都会发生冻融,冻融现象已成为北方地区重要的气候特征^[3]。

土地盐碱化是当今世界土地荒漠化的主要问题之一,冻融对土壤盐碱化的影响十分显著^[4]。国内外学者的研究多以冻融对盐碱土壤水盐运动的影响为主^[5-8]。土壤中盐分随季节而变化,春季土壤返盐严重;夏季盐分淋溶到土壤深层;秋季蒸发量大,盐分随之向表层移动;冬季,表层土壤形成冻结层,减缓盐分向表层的运移^[9]。冻融过程通过对土壤水分的运移使盐分重新分布^[10]。从某种意义上来说,冻融是土壤盐碱化独特的形成机制^[11],并且冻融所形成的盐碱化会对作物生长过程产生巨大的威胁^[12]。然而目前,冻融对盐碱土壤基本理化性质影响的研究相对较少。冻融过程中通过土壤水分的相变^[13],使不同深度的土壤含水量发生改变^[2,12],进而影响容重、溶质运移、水分入渗、有机质和 pH 等特性^[14-18]。在以往的研究中多是冻融作用对单一土壤性质的影响分析,实际上冻融对土壤的影响并非单方面的,而是受多重因素共同作用,所以需要对盐碱土壤中多个因素进行综合研究。从而更好地解释冻融对土壤盐碱化的影响。

河北省盐碱耕地总面积为 $7.8 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[19],其分布在滨海平原以及固安—辛集—邯郸一线以东的中部平原。该地区的盐碱土是在气候、地形、水文地质和海侵等多种环境因素以及人类活动的综合影响下形成的^[20]。近年来,土壤盐碱化问题越来越严重。本文以冬季冻融盐碱土壤和秋季未冻融土壤作为对照,探讨冻融对土壤含水率、全持水量、容重、饱和导水率、有机质、电导率以及 pH 的影响,从而为进一步研究和控制土壤盐碱化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省深州市大冯营乡(115°45'14" E, 38°01'43" N),地处河北平原,气候属温带大陆性季风气候,光照充足,雨热同期。年均气温 13.4 °C,年均降水量 481.7 mm,无霜期 195 d,年均蒸发量 1 242 mm。深州市属于浅层季节冻土区,12 月中旬土壤冻结,3 月中旬融化,冻融历时 90 多天。深州市北部的土壤,主要由滹沱河冲积物形成,多为砂壤土,而且地势低洼,排水不畅,盐碱化严重,多形成盐碱地集中地带。

1.2 样品采集与分析

于 2017 年 1 月 23 日至 2 月 16 日冬季土壤冻融期间和 10 月 6 日秋季未冻融期间进行土样采集,具

体取样时间为 1 月 23 日,1 月 26 日,1 月 29 日,2 月 1 日,2 月 4 日,2 月 7 日,2 月 10 日,2 月 13 日,2 月 16 日和 10 月 6 日。其中,1 月 23 日至 2 月 16 日为冻融试验组,于上午 9:00—11:00 进行取样,室外气温 0~8 °C。10 月 6 日为对照组,于上午 9:00—10:00 进行取样,室外气温 19 °C。在同一坡度、坡向的地段上设置代表性土壤剖面,其剖面分为 2 个深度(0—10, 10—20 cm),每个深度取 2 个重复,并在每个深度上采集原状土用于土壤理化性质的测定。

土壤含水率用烘干法测定;土壤容重与全持水量采用环刀法测定;土壤饱和导水率采用恒定水头法测定;土壤可溶性盐通过电导率仪测定(水土比为 5:1);土壤有机质含量采用灼烧法测定;土壤 pH 采用 pH 计测定(水土比为 5:1)^[21]。

土壤饱和导水率采用达西定律计算,计算公式为:

$$K_t = \frac{Q \times L}{A \times t \times H} \quad (1)$$

式中: K_t 为土壤饱和导水率(cm/s); Q 为渗透量(mL); A 为渗透横截面积(cm²); t 为渗透时间(s); L 为土柱长度(cm); H 为恒定水头(cm)

为使不同温度下所测得的 K_t 值便于比较,换算成 10 °C 时饱和导水率(渗透系数),计算公式为:

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t^0} \quad (2)$$

式中: K_t 为温度为 t (°C) 时土壤饱和导水率(mm/min); K_{10} 为温度为 10 °C 时土壤饱和导水率(mm/min); t^0 为测定时水的温度(°C)。

土壤有机质含量是通过测定土壤中的碳经灼烧后造成的土壤失重来计算^[22]。计算公式为:

$$\text{土壤有机质含量}(\%) = \frac{(m_1 - m_2) \times 1.724 \times 100}{m_1} \quad (3)$$

式中: m_1 为灼烧前土壤质量(g); m_2 为灼烧后土壤质量(g); 1.724 为碳换算成有机质的经验系数。

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行整理,采用 SPSS 19 软件对土壤理化性质进行相关性分析,利用 Pearson 相关系数评价各指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤水分变化

由图 1 可知,在 1 月 23 日至 2 月 16 日,0—10 cm 土层深度土壤含水率呈现降低趋势,10—20 cm 土层深度土壤含水率呈现增加趋势。1 月 23 日 0—10, 10—20 cm 土层深度土壤含水率基本一致,2 月 16 日二者含水率之间相差 8.96%,其原因是在试验初期冻融对土壤影响剧烈,土壤中水分处于冻结状态,0—20 cm 土层深度

土壤含水率基本保持不变。而在试验后期随气温回升,冻融逐渐减弱,0—10 cm 深度土壤发生日冻融循环,10—20 cm 土层深度土壤仍处于冻结状态,由于土壤中冻结缘水势梯度的作用,使土壤中的水分向冻结层运移,造成下层土壤含水率升高,并且表层土壤受蒸散发影响较大,所以表现出 10—20 cm 土层深度土壤含水率高于 0—10 cm 土层。相比未冻融土壤(10 月 6 日),0—10,10—20 cm 土层深度土壤含水率相分别增加了 3.69% 和 12.82%,由此可知冻融增加了土壤的含水

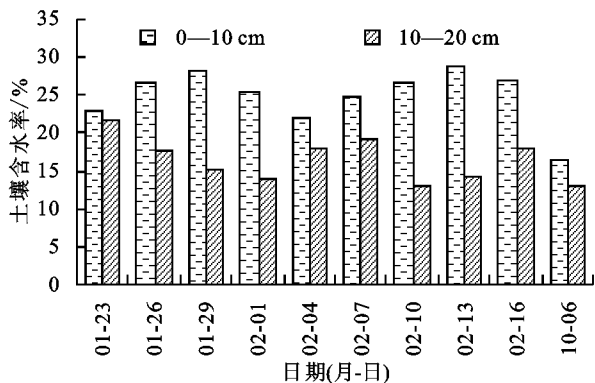


图 1 冻融对土壤水分的影响

2.2 土壤容重和饱和导水率变化

在冻融期间土壤水分频繁相变,土体出现的膨胀及收缩现象^[23],造成土壤容重发生变化。由图 2 可知,1 月 23 日至 2 月 16 日,0—20 cm 深度的土壤容重为 1.38~1.53 g/cm³。其中 0—10 cm 深度土壤容重呈增加趋势,10—20 cm 深度土壤容重整体变化趋于平缓。相比未冻融土壤,冻融增加了 0—10 cm 深度土壤容重,而 10—20 cm 深度土壤容重基本保持不变。其原因是冻融使 0—10 cm 深度土壤结构发生改变,由于水分的相变,使大团粒结构崩解破碎为小团粒结构,细小颗粒重新填充土壤孔隙,从而土壤更为密实,其容重也得以增加。对于 10—20 cm 深度的土壤水分仍处于冻结状态,其容重整体变化不明显。由于冻融使土壤水分发生相变而改变了土壤孔隙,进而影响了土壤的渗透性。由图 3 可知,1 月 23 日至 2 月 16 日,0—10 cm 深度土壤饱和导水率总体呈降低趋势;10—20 cm 深度的土壤饱和导水率整体呈增加趋势,二者呈现相反的变化趋势。因为 0—10 cm 深度土壤水分同时受蒸发、下渗的影响,土壤中孔隙重新被细小颗粒填充,土壤孔隙变小,其饱和导水率降低。而 10—20 cm 深度土壤中一直存在冰晶,造成颗粒间发生挤胀作用,土壤孔隙变大,所以饱和导水率呈上升趋势。2 月 10—16 日,0—10,10—20 cm 深度土壤饱和导水率出现陡降、陡增现象,由于 2 月中旬气温变化剧烈,较深层的土壤出现短暂融化现象,土壤中冰晶融化为液态水,很快从孔隙中排出,而孔隙未发

率,提高了土壤的保水能力,可有效缓解由春旱造成土壤水资源短缺问题。1 月 23 日至 2 月 16 日期间,0—10 cm 土层深度土壤全持水量的变化范围为 26%~31%,呈现降低趋势,是因为冻融作用使土壤水分发生下渗,表层土壤板结。10—20 cm 土层深度土壤全持水量的变化范围为 27%~32%,其整体趋势基本保持不变。而相比未冻融土壤,0—20 cm 土层深度土壤全持水量无显著变化。整体而言,冻融对 0—20 cm 土层深度的土壤全持水量影响较小。

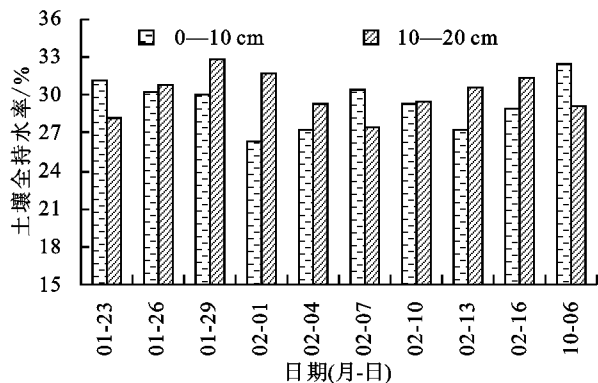
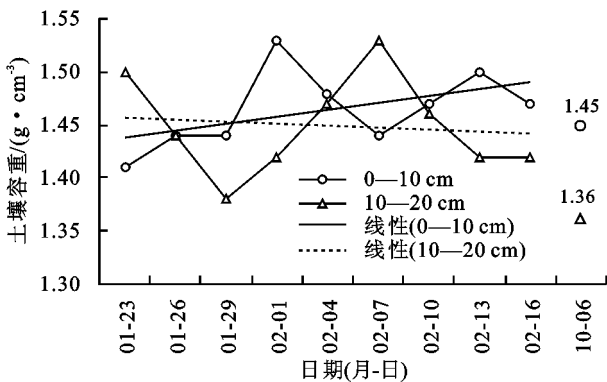


图 2 冻融对土壤容重的影响

生变化,因此土壤导水率出现陡增现象。而表层土壤更为密实,其导水率出现陡降现象。1 月 23 日至 2 月 16 日期间 0—10 cm 深度土壤均值为 0.048 5 mm/min,未冻融土壤饱和导水率为 0.052 4 mm/min;10—20 cm 深度土壤均值为 0.055 6 mm/min,未冻融土壤饱和导水率为 0.036 3 mm/min,可以看出冻融抑制了 0—10 cm 深度土壤的渗透性,促进了 10—20 cm 深度土壤的渗透性。



2.3 土壤电导率(盐分)和 pH 的变化

土壤电导率是测定土壤中水溶性盐的指标,相比以往测定土壤全盐量更加准确。由图 4 可知,在 1 月 23 日至 2 月 16 日,0—10 cm 深度土壤电导率呈增加趋势,10—20 cm 深度呈降低趋势。因为 0—10 cm 深度土壤受冻融影响剧烈,土壤水分运动缓慢,从而抑制了盐分的运移。在 2 月中旬冻融减缓,蒸散发作用增强,表层土壤水分逐渐减少,土壤盐分被积聚

于表层,而 10—20 cm 深度的土壤的含水率逐渐增加,盐分被稀释,电导率呈现降低变化。0—10 cm 深度土壤电导率的变化速率高于 10—20 cm 深度,说明冻融对表层土壤的影响更为剧烈。在 2 月 7 日 0—10,10—20 cm 深度土壤电导率均出现低谷值,可能是由于气温变化等因素造成。秋季未冻融期间 0—10 cm 深度土壤电导率是冬季期间的 1.6 倍,说明表层土壤盐分随季节变化秋季土壤盐分有向表层积聚的现象,而冬季冻融作用一定程度上抑制了土壤盐分向表层的积聚。土壤中盐分的变化与水分运动密切相关,冻融通过影响水分的相变过程,使得土壤冻结和融化过程中形成了特殊的水盐运移规律。0—10 cm 深度土壤含水率呈降低趋势而电导率呈增加趋势。由于表层土壤发生日冻融循环,土壤水分相变频繁,且蒸散发作用逐渐加强,其中一部分水分随蒸发散失到大气中,另一部分逐渐向下运移到冻结层,而土壤中盐分被析出并滞留于表面,所以 0—10 cm 深度土壤电导率与含水率呈相反的变化趋势。进一步说明了土壤盐分运移与水分的变化密不可分。

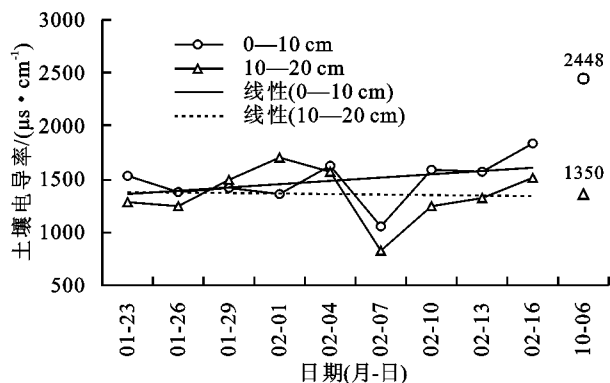


图4 冻融对土壤电导率和土壤含水率的影响

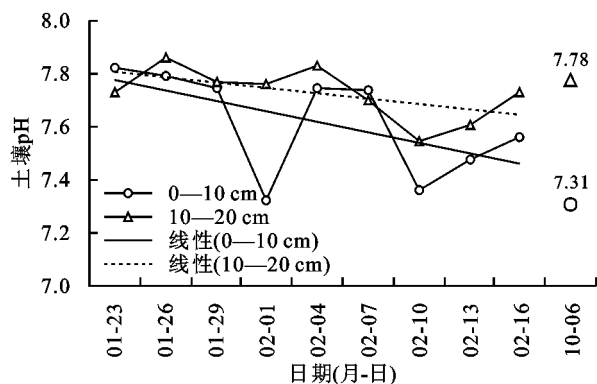


图5 冻融对土壤 pH 的影响

2.4 土壤有机质含量的变化

由图 6 可知,在 1 月 23 日至 2 月 16 日,10—20 cm 深度土壤有机质含量呈降低趋势,并且冻融前后相差 1.45%,说明冻融增加了土壤中有机质的含量。一方面冻融将土壤的大团粒结构破碎成小团粒结构,

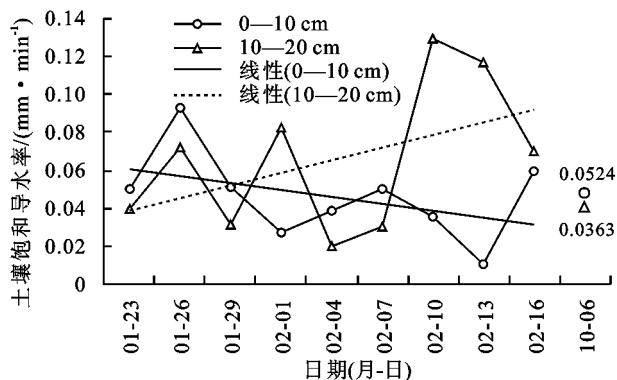
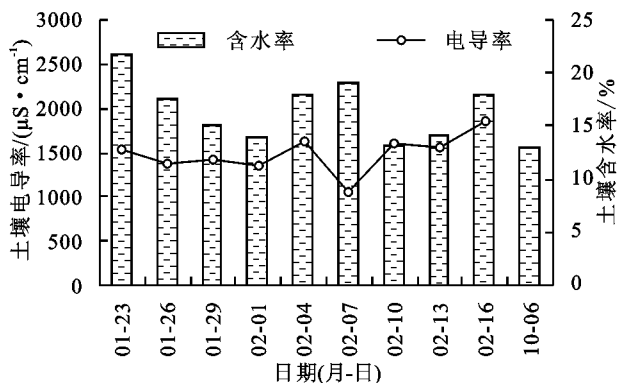


图3 冻融对土壤饱和和导水率的影响

由图 5 可知,在 1 月 23 日至 2 月 16 日,0—10,10—20 cm 深度土壤 pH 均呈降低趋势。是因为试验初期冻融强烈,土壤水分处于冻结状态,其化学反应进行缓慢,pH 基本保持稳定。随气温回升,冻融影响逐渐减小,土壤中微生物硝化作用增强,溶解性有机酸得以释放^[24],土壤溶液中 H^+ 浓度增加,土壤的 pH 降低。0—10 cm 深度土壤 pH 的变化速率明显快于 10—20 cm,并相比未冻融土壤,冻融明显增加了 0—10 cm 深度土壤 pH,这在一定程度上说明冻融对表层土壤影响较为剧烈。



有机质物质从团粒中释放出来,使得土壤中有机质的含量增加;另一方面土壤温度较低,破坏了微生物的生存环境,使其细胞内所含的养分及有机质释放到土壤中,也增加了有机质的含量。随着气温回升,冻融对土壤的影响减缓,土壤中微生物活动逐渐加剧,促使养分解物质的分解,造成土壤有机质含量整体呈下降趋势。而表层 0—10 cm 土壤有机质含量受多种因素影响,所以其有机质变化不明显。

2.5 土壤理化性质的相关性分析

由表 1 可知,0—10 cm 深度土壤容重与全持水量呈极显著负相关($P < 0.01$),与含水率呈显著负相关($P < 0.05$),说明土壤容重一定程度上取决于土壤含水率与持水能力。土壤容重较小时土壤疏松、孔隙较大、土壤持水能力强;当土壤容重较大时土壤板结、孔隙较小,土壤的储水能力较弱,土壤的持

水能力降低^[25]。土壤 pH 与容重呈极显著负相关,与含水率呈极显著正相关,与全持水量呈显著正相关,说明表层土壤 pH 受多种因素的共同影响。土壤饱和导水率、电导率和有机质与其他参数无显著相关性。10—20 cm 深度土壤容重与全持水量呈极显著负相关,与含水率呈显著负相关。土壤饱和导水率、有机质和 pH 与其他参数无显著相关性。土壤电导率与土壤容重呈显著负相关,与土壤全持水量呈显著正相关,进一步说明了土壤盐分的运移与土壤水分密不可分。

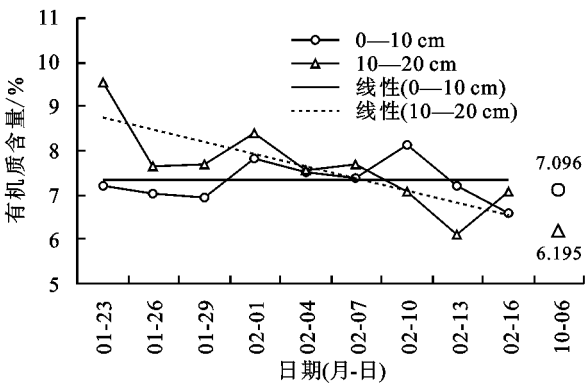


图 6 冻融对土壤有机质的影响

表 1 土壤理化性质相关系数

指 标	全持水量	容重	含水率	电导率	导水率	有机质	pH
全持水量	1	0.98B**	0.63B	0.69B*	0.22B	-0.28B	0.21B
容重	-0.96A**	1	-0.68B*	-0.68B*	-0.25B	0.37B	-0.10B
含水率	0.58A	-0.70A*	1	-0.03B	0.51B	-0.65B	-0.38B
电导率	-0.25A	0.18A	-0.09A	1	-0.01B	0.07B	0.33B
导水率	0.36A	-0.33A	0.26A	0.01A	1	-0.26B	-0.47B
有机质	-0.33A	0.40A	-0.44A	-0.23A	-0.48A	1	0.41B
pH	0.65A*	-0.81A**	0.79A**	-0.22A	0.33A	-0.55A	1

注:A组数据表示 0—10 cm 深度;B组数据表示 10—20 cm 深度;* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

3.1 冻融对土壤含水率、容重、饱和导水率的影响

本文通过野外采样和室内试验分析,探讨了冻融对盐碱土壤理化性质的影响。冻融作用增加了 0—20 cm 深度土壤含水率,但对全持水量影响较小。郭占荣等^[12]研究表明,在冻土的形成过程中,表层土壤含水率呈递增变化。冻融增加了 0—10 cm 深度土壤容重,说明冻融使表层土壤更加密实。而 10—20 cm 土壤容重整体变化平缓。温美丽等^[16]研究表明,冻融使疏松的小容重土壤变得更加紧密。冻融抑制了 0—10 cm 深度土壤的渗透性,其原因是冻融改变了土壤团粒结构,孔隙被重新填充,其导水率也逐渐变小。赵春雷等^[17]研究表明,在冻融后期 0—10 cm 土层饱和导水率显著下降。冻融促进 10—20 cm 深度土壤的渗透性,是因为冻融影响程度因土层深度不同而异^[17],10—20 cm 深度土壤中一直存在冰晶,土壤孔隙较大,造成导水率升高的现象。

3.2 冻融对电导率、pH、有机质的影响

随冻融减弱,0—10 cm 深度土壤电导率呈增加趋势,其土壤盐分有向表层积聚的现象,且土壤中水盐运移呈现出相反的趋势,王维真等^[11]研究表明,在冻融后期土壤盐分重新分配,0—10 cm 土层中的盐分随土壤水分的下渗和蒸发而在土壤表层积聚。土壤中盐分随季节而变化,秋季土壤中盐分向表层积聚,冬季冻融抑制了盐分向表层运移,这与张越等^[9]的研究结果一致。冻融期间 0—20 cm 深度土壤 pH 均呈现降低趋势,而与未冻融土壤相比,冻融增加了 0—10 cm 深度土壤的

pH。高敏等^[15]研究表明,冻融之后土壤的化学性质发生改变,降低了土壤的 pH。随冻融作用的减弱,10—20 cm 深度土壤有机质含量也有所降低,且高于未冻融的土壤,说明冻融增加了土壤有机质的含量。宋阳等^[2]研究表明,在冻融循环初期,有机碳含量较高,随冻融循环的持续,土壤中有有机碳呈现下降的趋势。0—10 cm 深度土壤有机质含量未发生明显变化,原因是表层土壤可能受环境因素和人为因素的影响。

4 结论

冻融增加了 0—20 cm 深度土壤含水率,对土壤全持水量的影响较小,并增加了 0—10 cm 深度土壤容重,降低了渗透性。对于 10—20 cm 深度土壤,冻融增加了有机质的含量,提高了土壤的渗透性。随冻融减弱,其土壤 pH 均呈现降低趋势。土壤盐分运移与水分变化密不可分,其表层土壤含水率与电导率呈相反变化趋势,并且秋季土壤盐分向表层积聚,冬季冻融抑制了土壤盐分向表层积聚。在相关分析中,0—20 cm 深度土壤容重与全持水量呈极显著负相关($P<0.01$),与含水率呈显著负相关($P<0.05$)。有机质和导水率与其他参数无相关性。0—10 cm 深度土壤 pH 与全持水量、容重、含水率呈显著相关。10—20 cm 深度土壤电导率与容重和全持水量呈显著相关,进一步说明了土壤盐分运移与土壤孔隙、土壤水分之间有关。

参考文献:

[1] Hobbie S E, Iii F S C. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics [J]. Biogeochemistry, 1996, 35(2): 327-338.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等.基于HYDRUS模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):135-142.
- [6] 邓玲,魏文杰,胡建,等.秸秆覆盖对滨海盐碱地水盐运移的影响[J].农学学报,2017,11(7):23-26.
- [7] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.
- [8] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J].水土保持学报,2017,31(2):301-308.
- [9] 张越,杨劲松,姚荣江.咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J].土壤学报,2016,53(2):388-400.
- [10] 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.
- [11] 王维真,吴月茹,晋锐,等.冻融期土壤水盐变化特征分析:以黑河上游祁连县阿柔草场为例[J].冰川冻土,2009,31(2):268-274.
- [12] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等.冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J].水科学进展,2002,13(3):298-302.
- [13] Zhao L, Cheng G, Ding Y. Studies on frozen ground of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4): 411-416.
- [14] 于博,赵兰坡,高聚林,等.松辽平原高产农田土壤孔性对冻结的响应及机理研究[J].中国农学通报,2012,28(24):80-85.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 赵春雷,邵明安,贾小旭.冻融循环对黄土区土壤饱和导水率影响的试验研究[J].土壤通报,2015,46(1):68-73.
- [18] 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.
- [19] 冯伟,刘忠宽,刘振宇,等.河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J].河北农业科学,2015(1):56-60.
- [20] 王磊.河北省盐碱土防治与综合利用[J].水科学与工程技术,2015(5):93-94.
- [21] 龚振平.土壤学与农学[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [22] 李婧.土壤有机质测定方法综述[J].分析实验室,2008,27(增刊1):154-156.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 赵锦梅,张德罡,刘长仲.东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J].自然资源学报,2012,27(3):422-429.
- (上接第77页)
- [17] 王美景,王军光,郭忠录,等.放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响[J].土壤学报,2016,53(2):365-374.
- [18] 李学增,黄炎和,林金石,等.不同宽度冲刷槽对崩岗崩积体产流产沙的影响[J].农业工程学报,2016,32(9):136-141.
- [19] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.
- [20] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.
- [21] 王志刚,杨海龙,刘慧博,等.河岸边坡草被减流减沙效应及其坡面流水动力学特征[J].水土保持学报,2016,30(2):8-13.
- [22] 李建兴,何丙辉,谌芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
- [23] 彭怡,王玉宽,傅斌,等.紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J].水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- [24] 潘声旺,雷志华,杨丽娟,等.几种典型边坡植被的产流、产沙特征[J].生态环境学报,2013,22(7):1167-1172.
- [25] 夏振尧,梁永哲,张雪娇,等.植被对含碎石土壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):92-97.