

河套灌区农田防护林网内土壤季节性冻融过程及水盐运移

郝可心¹, 肖辉杰¹, 辛智鸣², 王百田¹, 曹琪琪¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古 磴口 015203)

摘要: 为了解内蒙古河套灌区农田防护林内冻融期土壤水盐状况及运移规律,在 2020 年 10 月至 2021 年 4 月实测土壤水分、盐分、温度及相关气象数据,并进行相关分析。结果表明:土体表层温度波动较大,随土层深度加深土体温度变化逐渐平缓。冻结期气温下降速率低于消融期气温回升速率,加之土壤温度变化的滞后性,冻结期比消融期长 10 天左右。季节性冻融冻结作用导致表层土壤含水量升高、深层含水量降低,消融解冻时期,土壤含水量逐渐降低。两侧林带农田边缘(0.3 H、4 H)土壤表层含水量相比农田内部(1 H、2 H、3 H)含水量低,近林带土壤含水率较小的现象随土层加深逐渐消失,在 100 cm 土层距离林带不同距离土壤含水率几乎没有差别。经过冻融过程土体盐分含量呈现增高态势,土壤冻结导致盐分在各个土层出现聚积,且不断积累,消融时融解层土壤盐分向地表汇聚,同时深层土壤出现一定程度盐分流失现象。近林带农田土壤盐分积聚程度强于远林带。土壤水盐运移基本呈显著相关,同时土壤盐分变异性大于土壤水分变异性,说明土壤盐分的运移过程更为复杂。研究结果揭示了冻融期防护林网内农田土壤水盐运移规律,为灌区防护林内农业发展提供了基础理论依据。

关键词: 季节性冻融; 温度; 土壤水盐; 农田防护林

中图分类号: S152.7; S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0231-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.01.030

The Seasonal Freezing and Thawing Process of the Soil and the Characteristics of Water and Salt Transport in the Farmland Shelter Forest Net in the Hetao Irrigation District

HAO Kexin¹, XIAO Huijie¹, XIN Zhiming², WANG Baitian¹, CAO Qiqi¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Inner Mongolia

Dengkou Desert Ecosystem National Orientation Observation and Research Station, Dengkou, Inner Mongolia 015203)

Abstract: To understand the status of soil water and salt and its migration laws during the freezing and thawing period in the farmland shelter forest in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, the soil moisture, salinity, temperature and related meteorological data were measured and analyzed from October 2020 to April 2021. The results showed that the surface soil temperature changed significantly, and leveled off as the increasing soil depths. The rate of temperature decrease during the freezing period was greater than the rate of temperature rise during the thawing period. Considering the hysteresis of soil temperature changes, the freezing period was about 10 days shorter than the thawing period. Seasonal freezing caused the increased water content in the surface soil, and the decreased soil water content in the deep layer. During the thawing period, the soil water content gradually decreased. The surface soil water content in the farmland edges (0.3 H, 4 H) of the forest belts on both sides was smaller than that of farmland (1 H, 2 H, 3 H). The phenomenon of low soil water content in forest belts gradually disappeared with the deepening of soil layers. There was almost no difference in soil water content at different distances from the forest belt in 100 cm soil layer. During the freezing and thawing period, the salt content in soil increased. Soil freezing caused salt to accumulate in various soil layers. During the thawing, soil salt accumulated to the surface layer, and salt reduced in the deep soil. The degree of soil salt accumulation in farmland near forest belt was stronger than that in far forest belt. The transports of water and salt in soil basically showed a significant correlations, and the variability of salt was greater than that of water, indicating that the process of salt transport was more complicated. The results of this study revealed the law of soil water and salt movement in the farmland within the pro-

tection forest during the freezing and thawing period, and could provide a basic theoretical basis for agriculture in the irrigation area.

Keywords: seasonal freezing and thawing; temperature; soil water and salt; farmland shelter belt

盐渍土广泛分布在我国西北、华北、东北及沿海农业产业区内,是我国最主要的中低产土壤类型之一^[1]。北方地区土壤季节性冻融加剧土壤积盐^[2],从而造成季节性冻融区土壤盐渍化^[3]。春季土壤积盐严重损害农作物幼苗,降低农作物产量^[4],制约农业产业及生态环境可持续发展。因此,针对季节性冻融时期农田土壤水盐运移规律的研究具有十分重要意义。

土壤冻融是一个十分复杂的过程,伴随物理、物理化学、力学的现象和子过程,包括水分、热量的传递、水分的相变以及盐分聚集^[5]。我国对于非冻融时期土壤水盐方面的研究较多,对于冻融时期土壤相关研究起步较晚,上个世纪 80 年代才出现针对土壤冻结、土壤消融以及土壤冻胀、土壤盐胀方面的研究^[6-7],但对于冻融条件下土壤水盐运移仍然处于探索阶段。而农田防护林系统保护的农田土壤冻融机理更为复杂,影响因素更多,目前研究较少。

已有研究^[6]表明,土壤冻融过程中,土壤剖面发生结构变异,形成冻结层、似冻层、非冻结层,冻结时期冻结锋面从地表向下发育过程中,土壤液态水、气态水运动状态均呈上渗型,向冻结层下界面运移,土壤中水分迁移在毛管力作用下形成土壤水势,导致土壤表层水分含量增加。于炜等^[7]在探讨不同外界条件对土壤冻融作用中发现,土壤冻结作用可以增加水分迁移量,在 0—30,100—140 cm 深度下的土层中水分迁移作用明显,而在 30—60,60—100 cm 深度下的土层迁移作用不显著,针对冻结土壤水分的运移也有学者进行了相关模型运用及数值模拟^[8]。在盐分运移方面,国内外针对不同土壤覆盖方式、灌溉方式、土壤质地、蒸发作用对作物生长、水盐运移规律以及水盐积聚特征的影响做了一定探究^[6-9]。张殿发等^[10]研究认为,冻融作用是土壤盐碱化独特的形成机制,冻融条件下土壤中盐分迁移是水分对流、浓度梯度、温度梯度、不同溶质、土壤结构及质地等因素作用下的综合结果,温度是导致土壤中水分与盐分迁移的驱动力。李瑞平等^[11]进行了季节性冻融期土壤水盐的 BP 神经网络模拟,得到了水盐迁移的动态变化规律。目前研究认为,土壤水盐运移存在一定协同性,并且对农田土壤具有一定影响。张光辉等^[12]对防护林带边缘及周围农田土壤水分的研究发现,林带及草被蒸腾耗水及拦截径流会导致农田土壤含水率降低的现象;张宇清等^[13]在植物根系对土壤水分影响的研究中证明,新疆杨根系分布会造成土壤水分亏缺,影响

农作物生长。陈作州等^[14]在利用根障减轻防护林与农田竞争并分析此举对农作物产量的影响。农田土壤水分亏缺容易造成土壤盐分积聚,影响农作物生长发育。本文以内蒙古河套灌区内防护林农田试验场为研究对象,揭示季节性冻融过程及土壤水盐运移特征规律,探究农田防护林对土壤水盐的影响效果,为防治土地盐渍化及农田防护林建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古磴口县荒漠生态系统国家定位研究站,主要研究区位于中国林科院沙林中心第二试验场农田防护林内,地理坐标为(106°35′—106°59′E, 40°17′—40°29′N),海拔 1 050 m。该区属于温带干旱荒漠气候,年平均降水量 145 mm,蒸发量为 2 387.6 mm,年平均气温 7.6 ℃,昼夜温差大,日照充足,年日照时间约 3 000 h,无霜期 136 天,多年平均降水量约 145 mm,降雨主要集中在 6—9 月,约占全年降水量的 70%~80%,冻融期降水量较小。防护林林带、林网结构为小网格、窄林带,树种主要有新疆杨、小美旱杨、二白杨、沙枣等,对防护林结构进行调查,农田土壤类型为砂质壤土,主要农作物为玉米、西葫芦及向日葵。

本次研究选取研究地区应用较多的 2 行小美旱杨和 2 行二白杨行间混交的 4 行防护林配置,林带 340 m×120 m,南北走向,树龄 25 年,树高 25 m,株行距 2.5 m×1.5 m。

1.2 试验设计

试验在 2020 年 10 月至 2021 年 4 月冻融期进行,在防护林网内的农田进行取样,防护林主林带为西林带,沿主林带方向布设 3 条样线,分别在距离主林带 0.3 H(农田边缘)、2 H、3 H、4 H(另一侧林带边缘)处布设取样点(图 1)。整个冻融期内在各取样点进行人工取样,冬季冻土采用冲击土钻获取土样,取样深度分别为 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,为保证采样间隔密集,数据具有时间连续性,同时避免农业措施等影响,每月取样 2~3 次。取样密封装袋,在室内测定土壤含水量和电导率,设置 3 次重复;取样时同时使用土壤温度多参数记录仪测定土壤温度;气象数据(气温)利用当地生态观测站获取。

1.3 测试指标

1.3.1 土壤水分 将取好的土样放入铝盒中,带回实验室,采用烘干法(105 ℃,12 h)测定土壤含水量。

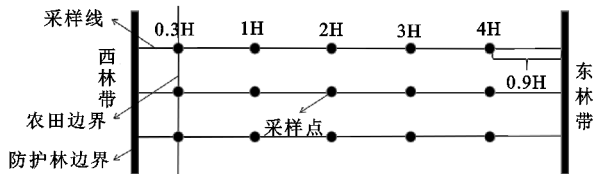


图1 农田内试验点分布

1.3.2 土壤盐分测量 土壤中盐分只有溶解到溶液中才能对作物产生严重危害,而土壤溶液电导率与土壤含盐量显著相关,土壤溶液电导率中的电解质浓度能够作为溶液中盐离子浓度反应土壤盐分情况,成为衡量土壤盐分的指标^[15]。

土样经自然风干、磨细并过 1 mm 筛后,按土水质量比 1 : 5 制备土壤浸提液,采用 DDS-307A 型电导率仪测定浸提溶液 EC 值,然后根据经验公式换算为土壤水溶性全盐质量分数。

$$C=(S+9.2)/2000 \tag{1}$$

式中: C 为土壤盐分质量含量(g/kg); S 为 25 ℃ 时土壤水浸出液的电导率(μS/cm)。

1.3.3 土壤温度 在取样点利用 HH2 Moisture Meter 土壤温度多参数记录仪测定,采用多时段定期测定的方式。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行统计分析,使用 Origin

2017 软件绘图,使用 SPSS 25 软件进行皮尔逊相关性分析,使用 Surfer 16 软件制作等高线图。

2 结果与分析

2.1 防护林内农田土壤冻融过程

2.1.1 冻融期气温与土壤温度变化 由图 2 可知,农田地表温度随气温降低而降低,且具有一定滞后性,土体温度随土层深度加深变化愈加平缓。11 月 15 日气温首次出现持续大幅下降,降温达 16.32 ℃,而 20 cm 表层土壤温度在 11 月 17 日开始出现下降趋势,下降幅度为 10.31 ℃。温度变化幅度上层土壤(0—20 cm)温度受气温影响变化最剧烈,变化趋势同气温变化最为接近,随土层深度加深,土壤温度变化渐趋平缓。整个冻融期气温温差最大可达 38.59 ℃,0—20、20—40 cm 土层温差最大为 25.56、20.87 ℃,而 40—60、60—80、80—100 cm 土层下温度变化都在 10 ℃ 左右。在冻融时间上,土壤冻结过程比消融时间更长,且随着土层深度增加,冻结和消融消耗时间逐渐减少。从 10 月 25 日开始,气温出现波动式下降,在 11 月 21 日出现负温,负温状态持续到 2 月末,气温上升过程在 4 月 1 日趋于平稳。土壤从表层开始冻结,0—20 cm 土层在 11 月 27 日出现负温,随土层加深,负温出现越来越晚,土壤各层均在 3 月逐渐解冻,在 4 月 1 日基本消融。

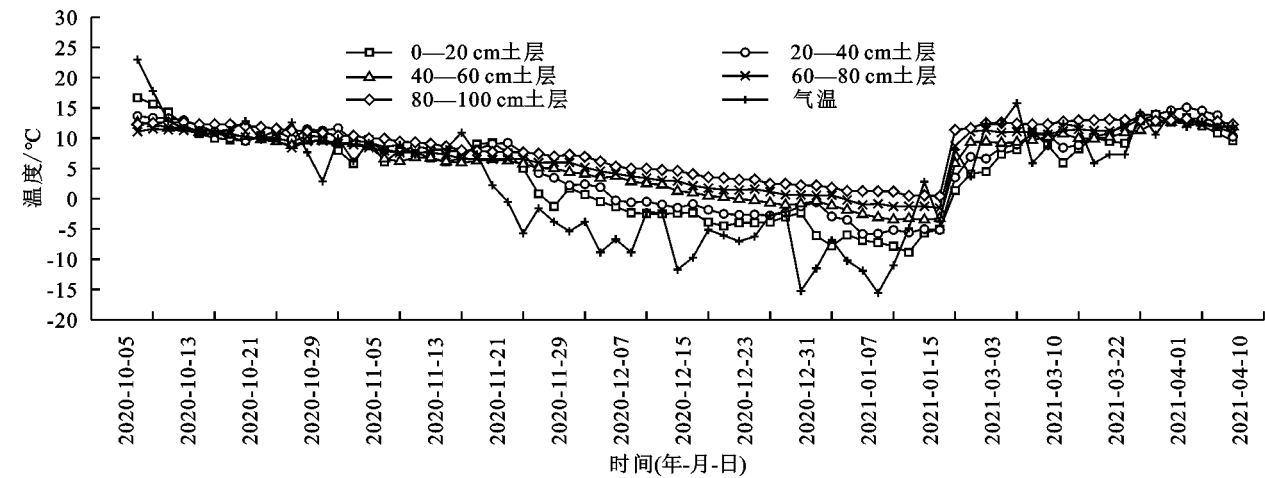


图2 冻融期防护林内农田土壤不同土层温度与气温变化

2.1.2 距林带不同距离土壤冻融过程 盐渍土冻融过程也会受土壤水盐含量影响,因为土壤含水量和含盐量会对冰点产生影响,土壤含水量越小,含盐量越大,土壤冻结温度越低^[16],有研究^[17-19]表明,在土壤含水量 20% 左右,含盐量 1 g/kg 左右,土壤冻结温度在-0.01 ℃。结合已有研究结论,以 0 ℃ 作为土壤冻结温度,冻结深度作为土壤冻结锋面,相应日期为土壤冻结日期。

由图 2 可知,根据气温变化及相应土壤温度变化,将土壤冻融过程划分为 3 个阶段,从 11 月 21 日气温开始出现负温,在距离林带不同距离(0.3 H、1 H、2 H、3 H、4 H)上,农田表层土壤分别从 11 月 25 日,12 月 3 日,

12 月 9 日,11 月 27 日,11 月 29 日出现负温,林带两侧树木遮挡太阳辐射,秸秆和枯枝落叶的回收使得土壤缺乏隔温层,表现出近林带土壤冻结时间开始较早,到 12 月 20 日左右,昼夜气温温差较大,表层土壤出现昼融夜冻现象,土壤产生水—冰、冰—水的交替相变过程^[20],这一阶段为初始冻结期。12 月 20 日之后气温逐渐下降,到第 2 年 1 月 6 日,日平均气温达到最低-16.49 ℃,此时土壤持续冻结,冻深不断增加,土壤开始持续进行水—冰的相变过程。此后,气温逐渐稳定,土壤温差变化幅度不大,1 月 6 日至 2 月中旬为稳定冻结期,2 月中下旬进入消融解冻期,气温逐步回升,表层土壤受气温作

用迅速升温,深层土壤温度变化幅度小且接近 0℃,因此土壤从地表和下部冻层同时解冻。整个冻融过程中,近林带土壤冻结期更长,同时消融时间相似,导致土壤中水分、盐分积聚程度不同。

2.2 冻融期农田防护林网内距林带不同距离土壤水分变化

由图 3 可知,冻融期防护林网内农田土壤含水量在各个土层呈现出不同变化,冻结作用导致表层土壤含水量升高,深层含水量降低。在 0—20 cm 表层土壤含水量于 11 月 5 日初始冻结开始到 12 月 15 日之间出现先升高、后降低、再升高的现象,整个冻融期间土壤表层含水量平均增加 14.87%,土壤含水量最高达 31.60%,同期 20—40,40—60 cm 土层含水量变化不明显,含水量在 27.23%~37.53%,在 60—80,80—100 cm 土层含水量分别降低 12.38%~14.13%。消融解冻时期,土壤含水量呈下降趋势,20—40 cm 土层含水率下降幅度最大,消融期结束土壤含水量下降 15.59%。

对比距离林带不同距离处土壤水分,农田边缘林带(0.3 H、4 H)表层土壤含水量相比远林带(1 H、2 H、3 H)含水量小,农田边缘林带表层土壤含水量平均为 27.12%,农田内部远林带土壤含水量平均能达到 30.26%,近林带含水量小的现象随土层加深慢慢消失,在 80—100 cm 土层距离林带不同距离含水率几乎没有差别。冻融期不同土层对比下,表层土壤含水量明显低于深层,含水量总体变化范围在 25.27%~45.68%。

2.3 冻融期农田防护林内土壤盐分变化

由图 4 可知,冻融期表层土壤出现 2 次盐分大量积聚,并且经过冻融时期土体盐分含量呈现增高态势。12 月 5 日冻结前期 0—20 cm 表层土壤盐分首次大幅度提升,并在短期达到最大值 0.46 g/kg,此时 80—100 cm 处深层土壤盐分含量也维持较高水平。第 2 次表层土壤盐分提升在 3 月 25 日,含量达 0.48 g/kg。随土层加深,盐分总体变化趋势相似,相比表层土壤,深层土壤盐分抬升时期滞后,总量低于表层土壤。

由图 5 可知,在距离不同林带距离上,盐分呈现出不同时空分布。冻结前期,表层土壤盐分含量较低,盐分在 80—100 cm 土层出现聚积。10 月 5 日至 11 月 15 日,距离林带不同距离 0—20 cm 土层土壤平均含盐量 0.21 g/kg,80—100 cm 土层平均含盐量达到 0.35 g/kg。冻结期,盐分随土壤水分迁移到冻层附近,土壤盐分含量最高可达 0.57 g/kg。消融期,融解层土壤盐分向地表汇聚,释放水分,盐分在地表出现快速积累,表层(0—40 cm)盐分普遍较高,最高可达 0.56 g/kg,同时深层土壤出现一定程度盐分流失现象,在 0.3 H 距离的近林带 60—80 cm 土层出现最低含盐量 0.26 g/kg。

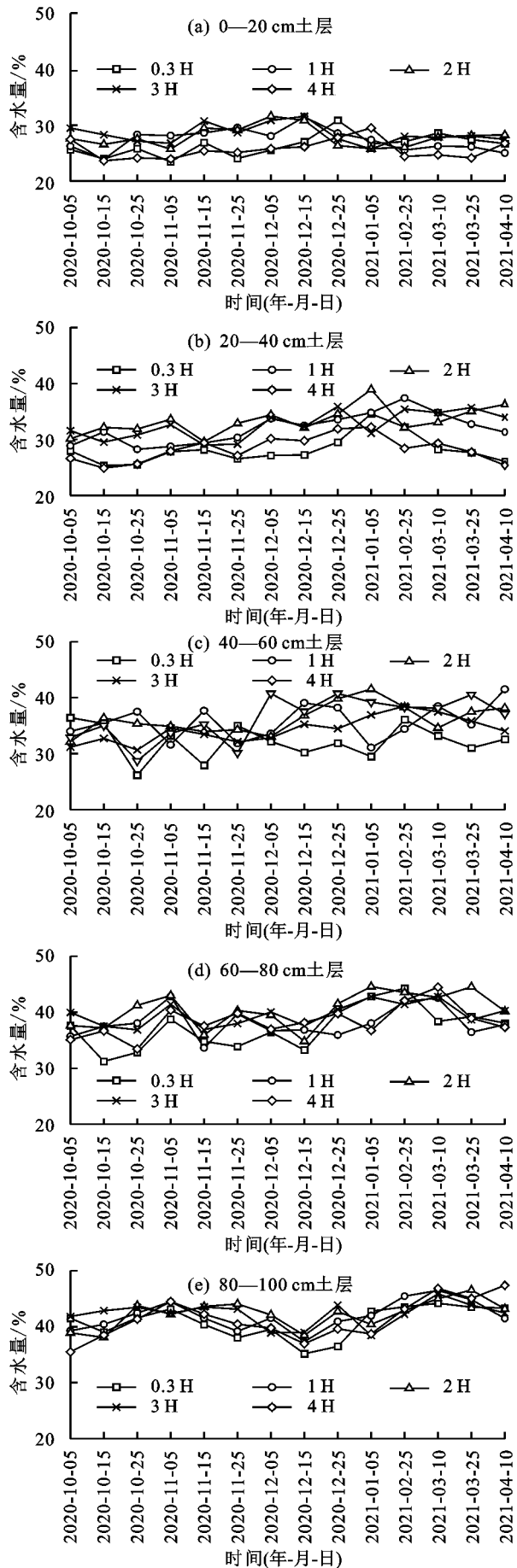


图 3 冻融期防护林内不同距离农田土壤不同土层含水量变化

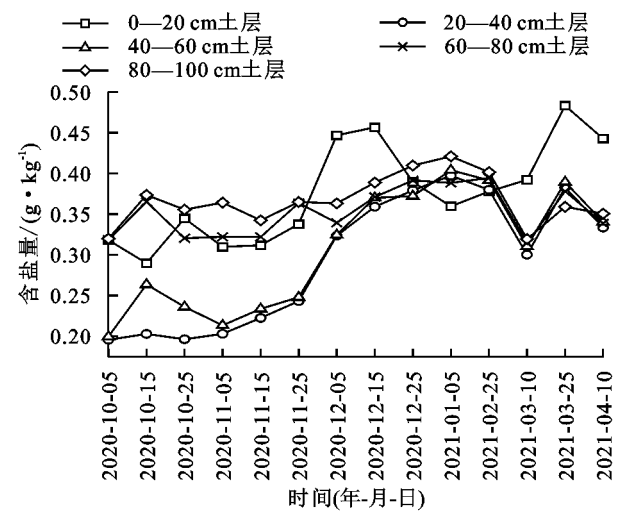


图4 冻融期防护林内农田土壤不同土层含盐量变化

林网内距林带不同距离处土壤盐分含量不同,近林带(0.3 H、4 H)总体土壤盐分含量略高于远林带(1 H、2 H、3 H),近林带土壤盐分含量平均为 0.35 g/kg,远林带土壤盐分平均含量为 0.33 g/kg。稳定冻结期深层土壤盐分积累以及消融期表层土壤返盐程度近林带都明显强于远林带。稳定冻结期深层土壤盐分聚积,在距林带 0.3 H 处,80—100 cm 土层盐分含量最高达到 0.61 g/kg。消融期 0—20 cm 土壤表层积盐达到 0.67 g/kg。相同土层稳定冻结期远林带处平均土壤盐分含量只有 0.36 g/kg,消融期远林带(1 H、2 H、3 H)处平均表层积盐仅有 0.43 g/kg。

2.4 土壤水分与盐分时间变异特征

由表 1 可知,冻融时期土壤水盐变化在不同土层呈现出不同相关程度。0—20 cm 表层土壤水盐相关系数为 0.173,相关性不显著;随土层加深,20—40, 40—60 cm 土层相关系数分别为 0.357,0.329,呈极显著相关;60—80 cm 土层相关系数为 0.245,呈显著相关;80—100 cm 土层土壤水盐相关系数呈负,但并未达到显著相关水平。

利用经典统计学方法对冻融期不同深度土壤水分、盐分的均值、标准差、变异系数进行分析^[21],土壤变异系数 $E<10\%$ 为弱变异, $10\%<E<100\%$ 为变异^[22]。

对初始冻结期、稳定冻结期、消融解冻期 3 个时期土壤水分、盐分变异性进行分析。由图 6 可知,盐分变异系数总体大于水分变异系数,盐分变异系数最高可达 24.28%,水分变异系数最高只有 10.36%。除初始冻结期表层土壤水盐变异程度较低,其余均为变异程度,3 个时期均在 40—80 cm 较为深层的土壤中含盐量变异程度达到最高,最高可达 24.28%。

3 讨论

季节性冻融气温变化导致土壤温度变化,形成冻

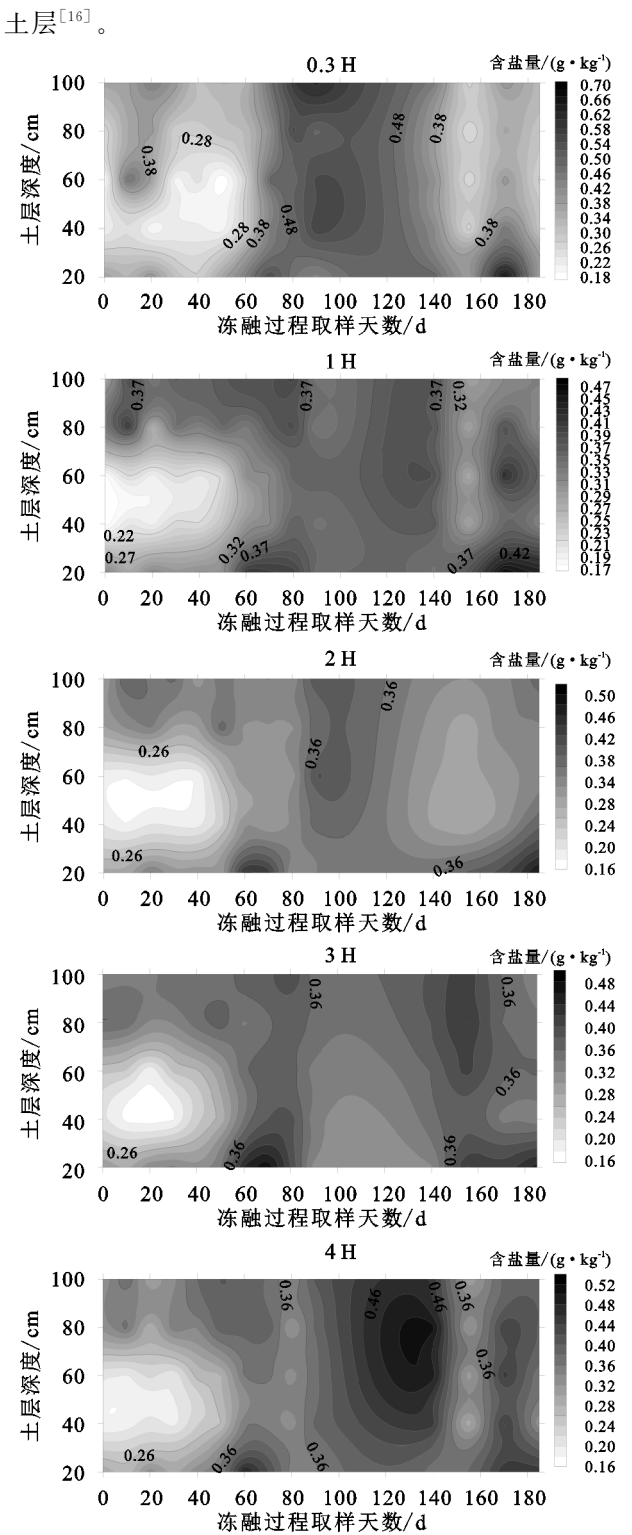


图5 冻融期防护林内不同距离农田土壤含盐量时空变化

表 1 冻融期不同土层土壤水盐相关性	
土层深度/cm	相关系数
0—20	0.173NS
20—40	0.357**
40—60	0.329**
60—80	0.254*
80—100	-0.195NS

注:表中数据为 Pearson 相关系数; ** 表示 $p<0.01$, * 表示 $p<0.05$, NS 为不显著。

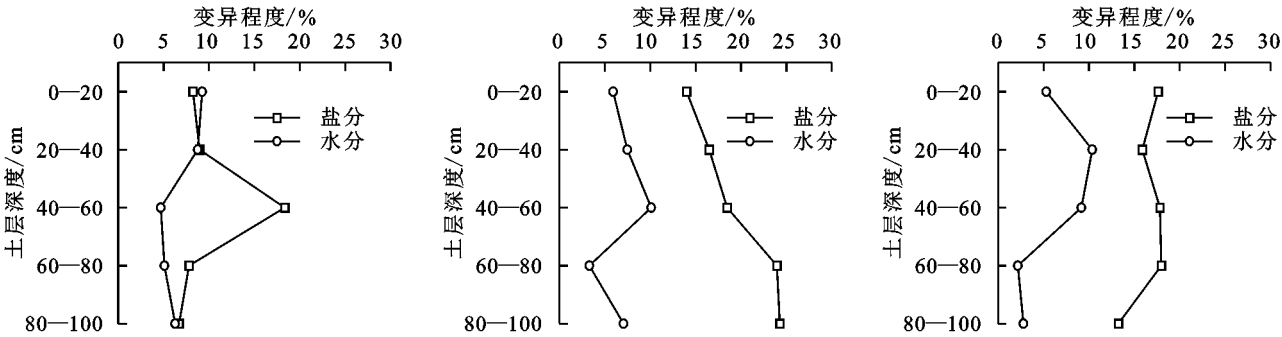


图 6 冻融期防护林内农田土壤水分、盐分变异程度

气温变化主导的季节性土壤冻融冻结作用由地表向下单向发生,在土壤冻结时,土壤水分吸收热量,造成土壤负温,随着土层加深,负温消耗增加,冻结时间进而延长;消融期表层土壤受温度作用,土壤存在非冻结层,深层土壤在土层保温及地下水作用下进行双向融解。整个冻融期冻结时间长,消融时间短,土壤消融速度比冻结速度更快。春季土壤快速消融导致土壤水分快速蒸发,土壤盐分快速积聚。

冻融初期表层土壤含水量呈现出波动状增加。土壤从表层开始冻结,昼夜气温温差大,表层土壤出现冻结融化交替出现,夜间气温下降,土壤水分冻结。受到黏滞性和水膜表面张力作用形成毛管水,土壤颗粒与冻结冰晶之间形成水势差,冻结时水分聚集到冰晶上^[23],而白天土壤融化又使液态水增加,昼融夜冻下水分不断迁移,冻结作用强于融化作用导致土壤含水量增加,有学者^[22]通过对土壤中水流迁移及通量模拟中得出,土壤水在水势和温度梯度作用下在冻结锋处聚集形成通量峰值,冻结作用强于融化作用,与本研究结论一致。稳定冻结期持续发展,深层土壤水分补给逐渐变少,受到表面蒸发、缺乏降水的作用,土壤含水量减小。消融阶段,土壤表层含水量下降。气温不断攀升,表层融化水分蒸发,土壤水势下降,深层土壤随融化水分逐渐饱和,随气温升高土壤不断解冻。冻结初期及稳定冻结期,距离林带不同距离下近林带农田边缘土壤含水量低于远林带农田内部土壤,这种现象在表层土壤最为明显,随土层加深含水量差异逐渐消失,冻融期间土壤含水量受到地表蒸腾及林带根系作用,林带遮光及根系吸水造成近林带土壤冻结早、冻结快,林带边缘含水量小。

土壤属于多孔介质,盐分以对流和弥散的形式在土壤中迁移^[22],冻融时期土壤中盐分以不同方式存在,部分盐分跟随水分冻结,部分盐分在冰晶中析出,溶于未冻水运移^[20]。冬季持续的土壤冻结,盐分在冻层聚积,主要原因是似冻层水分向冻层迁移,土体冻胀导致土壤空隙扩大,水分随之进入冻结至饱和状

态,盐分此时在冻结层累积,此外由于秋浇等农业行为,加之蒸发作用逐渐减小,造成部分表层土壤盐分被淋洗至深层土壤。随冻结锋面不断加深,盐分在冻结过程中形成不同浓度梯度进行弥散运移,冻层继续加深,冻结锋面向下发展,在温度和水势梯度作用下,大量盐分在冻结层聚积。消融期由于地表蒸发,上部土壤水分蒸发消耗,中间层冻土阻隔表面融水下潜,形成上层滞水,诱发盐分的二次抬升,导致土壤整体盐分含量上升,尤其是表层土壤积盐严重,形成春季返盐,王维真等^[24]在对不同冻融土壤及覆盖类型的研究中,也得到了相同结论。冻融时期土壤盐分的二次抬升导致表层积盐在诸多研究中被证实,与本次研究结论相同。此外,本次研究还发现,消融时期由于消融速度快,部分盐分向下层土壤流失,造成深层土壤脱盐。同时针对防护林带内土壤水盐运移情况发现,距离林带不同距离农田土壤盐分聚积效果不同,可能是由于林带遮挡导致阳光辐射程度不同,蒸发效果不同导致,由于树木根系作用,导致近林带农田土壤盐分积聚程度强于远林带。林带边缘土壤盐分的大量聚积导致林带胁地效果加强,影响农作物春季生长发育。可以通过农业措施减轻林带的积盐效应,有研究^[25]显示,采用不同覆盖方式能够实现蓄水保墒控盐作用。此外,在土壤水盐相关性方面,20—80 cm 土层中土壤水盐基本呈显著相关,说明冻融主要发生在此土层深度范围内,且水盐运动程度相对一致。同时土壤盐分时间变异程度高于土壤水分变异性,说明盐分迁移程度高,且土壤盐分运动相对土壤水分更复杂,需要进一步深入研究。

4 结论

季节性冻融农田防护林内土壤冻结期比消融期时间长,冻融从地表开始向下发生。农田地表温度随气温降低而降低,且具有一定滞后性,土体温度随土层深度加深变化愈加平缓。

冻结期冻结作用导致表层土壤含水量升高、深层含水量降低;农田边缘近林带(0.3 H、4 H)表层土壤

含水量相比农田内部远林带(1 H、2 H、3 H)表层土壤含水量小,近林带土壤表层含水量下降时间相比远林带延后,近林带含水量较小的现象随土层加深慢慢消失。冻融期表层土壤在冻结和消融时期分别出现 2 次盐分大量积聚,并且经过冻融时期土体盐分含量呈现增高态势,深层土壤出现脱盐现象近林带农田土壤盐分积聚程度强于远林带。

冻融期土壤水盐运移大体呈现出显著相关性,冻融时期不同土层盐分变异系数基本大于水分变异系数,农田防护林内土壤盐分运移机制比水分复杂程度更高。

参考文献:

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.

[2] 富广强,李志华,王建永,等.季节性冻融对盐荒地水盐运移的影响及调控[J].干旱区地理,2013,36(4):645-654.

[3] Zhang D F, Wang S J. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in northeast China [J]. Environmental Geology,2001,41(1/2):96-110.

[4] Jiang J, Huo Z L, Feng S Y, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on spring wheat growth and yield in arid Northwest China [J].Journal of Arid Land, 2013,5(2):143-154.

[5] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001.

[6] 宗芹,阿拉木萨,骆永明,等.冻融条件下沙丘土壤水分物理性提升的试验研究[J].水土保持学报,2013,27(1):230-234,239.

[7] 于炜.科尔沁沙地坨甸相间地区冻融期土壤水热运移规律数值分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[8] Hunsaker D J, Clemmens A J, Fangmeier D D. Cotton response to high frequency surface irrigation [J].Agricultural Water Management,1998,37(1):55-74.

[9] 贺欢,田长彦,王林霞.不同覆盖方式对新疆棉田土壤温度和水分的影响[J].干旱区研究,2009,26(6):826-831.

[10] 张殿发,郑琦宏.冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J].地理科学进展,2005,24(4):46-55.

[11] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.季节性冻融土壤水盐动态预测 BP 网络模型研究[J].农业工程学报,2007,23(11):125-128.

[12] 张光辉,于艳,刘宝元.东北黑土区防护林带对土壤水分影响的研究[J].水土保持学报,2006,20(6):54-57,74.

[13] 张宇清,朱清科,齐实,等.梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响[J].生态学报,2005,25(3):500-506.

[14] 陈作州,张宇清,吴斌,等.根障对农田林网内土壤水分和小麦产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):71-77,89.

[15] 林义成,丁能飞,傅庆林,等.土壤溶液电导率的测定及其相关因素的分析[J].浙江农业学报,2005,17(2):83-86.

[16] 陈军锋,杨军耀,郑秀清,等.地下水浅埋条件下单向冻结土壤水热变化试验[J].农业机械学报,2014,45(12):146-151,248.

[17] 靳志锋,虎胆·吐马尔白,牟洪臣,等.土壤冻融温度影响下棉田水盐运移规律[J].干旱区研究,2013,30(4):623-627.

[18] 邢述彦.土壤冻结温度测定试验研究[J].太原理工大学学报,2004,35(4):385-387,409.

[19] 邴慧,马巍.盐渍土冻结温度的试验研究[J].冰川冻土,2011,33(5):1106-1113.

[20] 郑冬梅,许林书,罗金明,等.松嫩平原盐沼湿地冻融期水盐动态研究:吉林省长岭县十三泡地区湖滩地为例[J].湿地科学,2005,3(1):48-53.

[21] 史文娟,马媛,徐飞,等.不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性[J].水科学进展,2014,25(4):585-593.

[22] 吴谋松,王康,谭霄,等.土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J].水科学进展,2013,24(4):543-550.

[23] 刘小燕,刘巧玲,刘廷玺,等.科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J].水科学进展,2015,26(3):331-339.

[24] 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.

[25] 梁建财,史海滨,李瑞平,等.覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):98-105.