

文章编号: 1000-0240(2009)02-0268-07

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

王维真, 吴月茹, 晋 锐, 王 建, 车 涛

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冻融作用是土地盐碱化的形成机制之一, 对冻融区春季积盐有明显的控制作用. 在冻融过程中, 土壤剖面结构发生变异, 形成冻结层、似冻结层和非冻结层. 以祁连山黑河上游阿柔草场为例, 研究了解冻期土壤水盐运移变化特征. 阿柔草场隶属青海祁连山地区, 地处西北高寒地区, 为季节性冻土区, 大面积土壤经历冬冻春融的冻融循环. 这种循环引起了土壤中水分和盐分运移的特殊规律, 即冻结时土壤中的水分和盐分向冻层迁移, 使得冻层的土壤含盐量明显增加; 而融化时, 由于地表蒸发, 土壤中的水分和盐分又向地表强烈迁移, 从而造成盐分在地表积聚, 诱发盐分两次抬升.

关键词: 土壤; 冻融; 水分; 盐分; 运移

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

黑河上游寒区水文试验的科学目标是“以理解寒区水文过程、提高寒区定量遥感水平为主旨, 以积雪和冻土为主要研究对象, 开展微波辐射计、激光雷达、高光谱成像仪航空遥感和地面同步观测, 并选择典型小流域进行长期寒区水文过程观测. 以航空遥感为桥梁, 以地面真实性检验为标准, 改进与发展卫星遥感数据反演寒区水文过程变量和参数的方法. 构建上游寒区航空-卫星-地面综合数据集, 应用于改进和验证寒区陆面/水文过程模型”^[1]. 阿柔草场作为黑河流域遥感-地面观测同步试验(简称“黑河遥感试验”)项目上游寒区水文试验中的加密观测区之一, 其目标即围绕地表冻融状态和土壤水分两个核心水文变量, 开展航空-卫星-地面遥感综合观测试验.

目前, 对非冻融土壤中水盐运移研究较广泛和深入, 但对季节性冻融条件下土壤中水盐运移内在机制的研究较少. 20 世纪 30 年代以来, 国外学者从不同角度对此问题进行讨论; 80 年代以后, 我国

学者对季节性冻融条件下土壤中水盐运移研究才逐步重视, 但仍处于探索阶段, 尤其在田间条件下处于开放的自然体系中, 影响和控制因素众多^[2-3]. 土壤冻融作用是土壤盐碱化独特的形成机制, 对冻融区春季积盐有明显的控制作用. 在冻融过程中, 土壤剖面结构发生变异, 形成冻结层、似冻结层和非冻结层^[4]. 土壤经历冬冻春融的冻融循环, 引起了土壤中水分和盐分运移的特殊规律, 即冻结时土壤中的水分和盐分向冻层迁移, 使得冻层的土壤含盐量明显增加; 而融化时, 由于地表蒸发, 土壤中的水分和盐分又向地表强烈迁移, 从而造成盐分在地表积聚, 诱发盐分两次抬升^[4-5]. 在季节性冻融情况下, 土壤盐分随季节变化, 全年可划分为 4 个动态周期: 春季积盐期、夏季脱盐期、秋季回升期和冬季潜伏期^[6-7]. TDR (Time Domain Reflectometry, 时域反射仪) 法作为测量土壤水分的一种有效技术, 具有不破坏样本、快速、容易操作等优点, 已经被广泛地应用到黑河流域各研究项目的野外观测试验中. 使用 TDR 可以同时测量土壤体积含水量及土壤体积电导率(与土壤溶液中的盐分含

收稿日期: 2009-01-11; 修订日期: 2009-03-12
基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”子课题“黑河流域上游寒区水文遥感-地面同步观测试验”(KZCX2-XB2-09-01); 国家自然科学基金项目(40875006)资助
作者简介: 王维真(1967—), 男, 山西万荣人, 2004 年在日本九州大学获博士学位, 主要从事土壤水文学和气象环境水文学研究.
E-mail: weizhen@lzb.ac.cn

量显著相关),从而促进了对冻融过程中土壤水分和盐分运移特征的研究^[8-9].

以往主要将土壤全盐量作为作物的耐盐指标,实际上土壤全盐量反应的是土壤盐渍化程度,土壤中的盐分只有溶解到土壤溶液中才会对作物产生直接的危害,因而盐害的诊断以土壤溶液盐浓度作为指标会更准确^[10].而土壤溶液电导率与土壤含盐量显著相关^[11],测定土壤溶液电导率已有一些方法报道^[12-13].土壤溶液电导率反映溶液中电解质的浓度,在一定程度上也反映了溶液中盐离子浓度,作为土壤盐分对作物危害的诊断指标,比以往所用的土壤全盐含量更为客观准确^[10].本文以黑河上游阿柔草场为研究对象,对阿柔草场土壤可溶解盐分进行了室内测试,并使用 TDR 对冻融期间土壤水分和盐分变化特征进行分析,探讨土壤水盐运移规律,为防治阿柔草场土地盐碱化及生态环境保护提供科学依据.

1 试验概述

试验区位于黑河上游子流域八宝河流域中部的河谷地带的阿柔乡,隶属西北高寒区,平均海拔 3 010 m,地势开阔平坦,植被覆盖类型为草地,土壤类型为高山草甸土.土壤在 10 月底至 11 月初开始冻结,翌年 5 月上、中旬才能消融,整个冻融期长达半年之久.其中,解冻期大约从 3 月底 4 月初开始,历时约 1 个月,形成了区域季节性冻融.在冻融过程中,土壤剖面结构发生变异,形成冻结层、似冻结层和非冻结层.土层自上向下冻结发育过程中,似冻层水分向正冻层迁移,冻结层自上向下消融时已融化的土壤水分向上运移和蒸发,诱发盐分两次抬升.

2008 年的 3 月 19 日上午及 4 月 1 日的上、下午,进行了冻结和融化状态下土壤含水量和含盐量的微波航空遥感地面同步观测试验,取得了较好的冻融状态下的土壤水分和土壤盐分数据.土壤含水量采用 Stevens 公司生产的 Stevsnns TDR 和环刀取土-烘干称重的方法测定,土壤盐分采用 Stevens TDR 测得的电导率值($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)代替,温度采用 Stevens TDR 测得的温度值($^{\circ}\text{C}$).Stevens TDR 为频率反射仪,工作频率为 50 MHz.仪器由 3 部分组成:POGO 便携式土壤传感器和 Stevens Hydra 探针和掌上电脑(图 1a).仪器各主要参数的测量范围见表 1. TDR 是基于土壤介电常数的测量来测量土壤水分的,水的介电常数是 80($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时),而

土壤固体介电常数是 2~5,冰在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的介电常数为 3,水的介电常数比土壤和冰的介电常数大的多.因此,土壤的介电常数主要受土壤液态含水量的影响(主要土壤成分的介电常数见表 2).所以, TDR 测量的含水量只是土壤中的液态含水量.烘干法则可以测定土壤中全部含水量,包括固态冰和液态水的含量.

表 1 Steven Hydra probe 探头技术规范说明

Table 1 Technical specifications of the Steven Hydra probe		
测量参数	测量范围	精度
介电常数	1~80	$\pm 1.5\%$ 或 0.2
非有机质 & 矿质土土壤水分	0~饱和	$>\pm 0.03$
电导率	$0.1\sim 15\text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	$\pm 2.0\%$ 或 $0.05\text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$
土壤温度	$-10\sim +65\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$

表 2 主要土壤成分的介电常数^[14]

Table 2 Dielectric constant of the primary soil component ^[14]	
介质材料	介电常数
空气	1
水	80 at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
冰	3 at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
玄武岩	12
花岗岩	7~9
砂岩	9~11
干壤土	3.5
干沙	2.5

数据采样方式采用垂直于航带方向的样带方式,共布设 6 条 1~2.5 km 的样带(图 1b),每一样带每隔 100 m 布设一个数据采样点,分别标记为样点 1,样点 2...,进行地面同步测量.在每一个样点上采用 TDR 进行土壤液态水含量、土壤温度及土壤盐分的测定,并同时通过环刀取土,带回到室内烘干称重得到全部水分含量.3 月 19 日只进行了冻土状态监测,沿着样带从样点 1 开始至样点 20,试验从上午 9:20 开始到 11:10 结束,约 2 h,每个样点的测定大约需要 6 min.4 月 1 日的冻融土监测试验中,08:20~12:00 进行冻土的测定,下午 14:00~16:00 点进行融土的测定.测定中采用往返路线,冻土的测定从样点 1 开始到样点 20 结束,融土的测定从样点 20 开始到样点 1 结束.

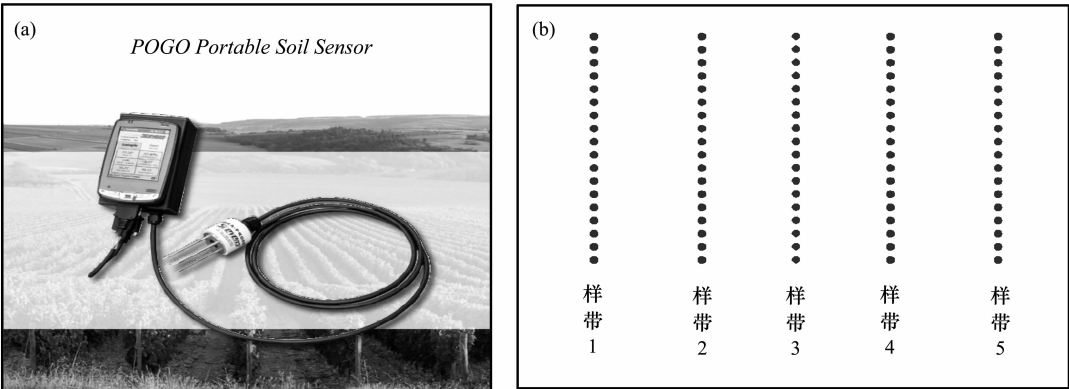


图 1 Stevens TDR 示意图(a)和样带示意图(b)

Fig. 1 Photo of Stevens TDR (a) and schematic diagram of strips for data sampling (b)

2 结果和分析

2.1 土壤可溶解盐分的室内测试

Wang 等^[15] 提出如下关系： $EC_{1:x} = x^{-n} EC_{1:1}$ ($n \leq 1$), 且当 $x = \epsilon \rho_w / (1 - \epsilon) \rho_d$ 时, $EC_{1:x}$ 值为饱和土壤溶液的电导率值, 即 EC_{SAT} , 代表了土壤中的可溶解盐分含量. 式中: $1:x$ 为土壤溶液中的土水质量比; ϵ 为土壤孔隙率; ρ_w 为水密度; ρ_d 为土粒密度. 根据 Wang 等^[15] 提出的方法, 我们对阿柔草场进行了土壤可溶解盐分的室内试验测量(图 2). 在室内将土样风干、过筛、称重, 然后加入一定量的娃哈哈纯净水($EC=0.075 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, $\text{pH}=7.5$) 配置成水土质量比为 $1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5$ 的土壤溶液样品. 用力振荡配置好的土壤溶液样品, 使土壤中的易溶盐分和可溶解盐分充分溶解且均匀混合. 振荡后的土壤溶液样品密封并静置 $7 \sim 8 \text{ h}$, 然后使用电导计(WM-22EP, DKK·TOA)测定土壤溶液上层悬浮液的电导率值(图 2), 并校正到 25°C . 从图 2 上可以看出, 所测的溶液电导率值与溶液的水土质量比呈现出较好的幂指数关系(图中纵坐标为对数转化后的坐标):

$$EC_{1:x} = 0.9341x^{-0.0276}$$

最后计算得到 EC_{SAT} 大约为 $2.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. 根据 U. S. Salinity Laboratory 在 1954 年提出的土壤溶液饱和电导率超过 $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 土壤即为盐化土壤. 阿柔草场土壤溶液饱和电导率虽然小于临界值, 但已接近, 所以应该引起足够的重视, 以防止阿柔草场发生次生盐碱化.

2.2 冻融过程中土壤温度变化

从 4 月 1 日的原始测量资料中可以看出, 上午

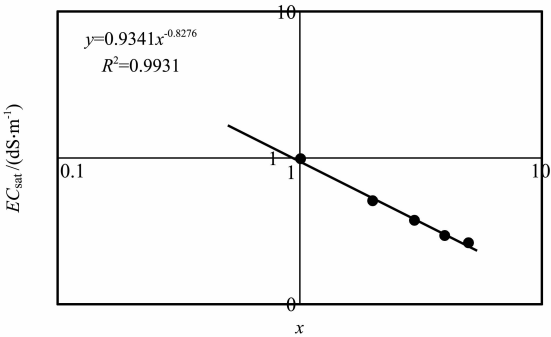


图 2 阿柔草场土壤溶液电导率值与土壤溶液中水土比例的关系

Fig. 2 Relationship between EC and x of soil solution from the Arou pasture

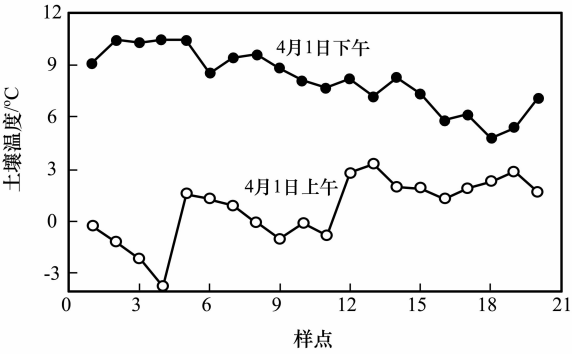


图 3 冻融过程中土壤温度变化

Fig. 3 The soil temperatures at different sampling sites at AM and PM April 1st

10:30 之前土壤还处在冻结状态, 冻土温度大都低于 0°C ; 10:30 之后, 土壤温度逐渐升高, 开始大于 0°C , 此时土壤处于微融化状态. 由图 3 可以看出, 土壤冻结时(包括微融化状态)的温度基本都小

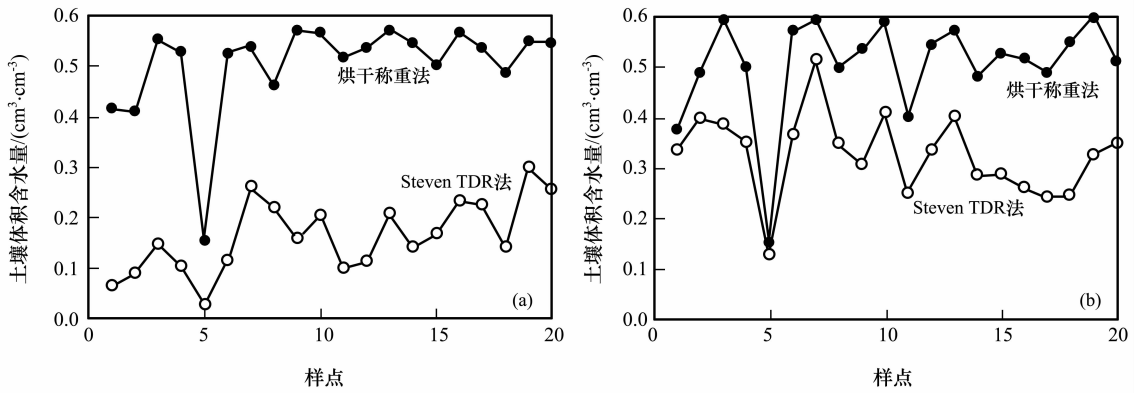


图 4 Steven TDR 和烘干称重法测定含水量的对比

a. 2008 年 4 月 1 日上午; b. 2008 年 4 月 1 日下午

Fig. 4 Soil moistures measured with TDR and oven drying method

于 5℃，只有在接近上午 11:00 时少数样点的土壤温度大于 5℃。这是由于地表接受太阳辐射造成土壤温度上升，此时土壤开始慢慢融化。在下午进行的融土状态测量中，随着时间的推移，土壤的温度在逐渐的上升，融化后的土壤温度都大于 5℃，最高温达到 12℃。

2.3 冻融过程中土壤水盐变化特征

在冻融过程中，土壤水分发生两次迁移，即冻结过程中向冻层的第一次迁移及融化过程中向表层的第二次迁移，土壤中的盐分随着水分也进行两次迁移，形成两次积盐。

图 4(a)和(b)为 4 月 1 日上午和下午分别用烘干法和 TDR 测量得到的土壤表层的土壤水分含量图，由于测量原理的不同，两种方法得到的土壤体积含水量并不相同。烘干法测得的含水量是土壤中的全部水分含量，包括固态冰和液态水；TDR 测得的只是土壤中的液态水含量。因此，烘干法测得的水分含量远大于 TDR 测得的水分含量。4 月 1 日上午烘干法测的含水量范围为 0.154~0.572 cm³·cm⁻³，TDR 测的含水量的范围为 0.028~0.299 cm³·cm⁻³，其差别范围为 0.126~0.426 cm³·cm⁻³；4 月 1 日下午烘干法测的含水量范围为 0.150~0.602 cm³·cm⁻³，TDR 测的含水量的范围为 0.127~0.513 cm³·cm⁻³，其差别范围为 0.023~0.306 cm³·cm⁻³。同一样点上烘干法测的含水量与 TDR 测的含水量的差值即为土壤冻结中的含冰量，由于测量的地点无法完全吻合，所以得出的含冰量并不是一个绝对值。从图 4 中可以看出，上午两种方法测定的土壤含水量值的变化范围要大于下午土壤含水量的变化范围，说明上午土壤

中有很多冻结的固态冰；下午随着温度的上升，土壤表层开始融化，所以此时 TDR 法和烘干称重法的差别范围在缩小。

除此外，于 3 月 28 日在阿柔草场内的一个定点，按 0.5 h 的时间间隔用 Steven TDR 连续测定土壤表层液态水分变化。TDR 测值的时间序列表明了土壤液态水分含量消融变化特征(图 5)。随着时间的推移，土壤温度的上升，土壤开始消融，冻结的固态冰逐渐转变为液态水，使液态水含量不断增加。9:00 点时刻土壤中的液态水含量为 0.273 cm³·cm⁻³，下午两点表层土壤水分达到 0.35 cm³·cm⁻³，日消融过程中土壤水分含量变化达到 0.08 cm³·cm⁻³。

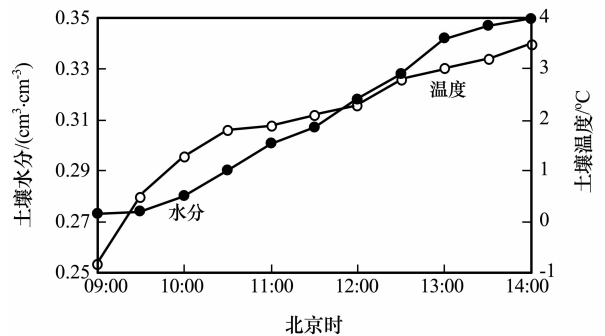


图 5 土壤水分和温度随时间变化

Fig. 5 Soil moisture and temperature changing with time

图 6(a)和(b)分别为 2008 年 3 月 19 日和 4 月 1 日上午对样带 4 中 20 个样点进行的土壤水分和盐分变化比较图。从图中可以看出，3 月 19 日的土壤水分和盐分要高于 4 月 1 日的水分和盐分，且水分和盐分的变化趋势基本一致。3 月 19 日，由于冬

季长时间的土壤冻结,在温度梯度的作用下,似冻层的水分不断向冻层运移;因冻胀的影响,土壤空隙体积增加,水分不断地向空隙中运动并随之冻结,使冻层含水量达到最大,甚至达到饱和状态. 4月19日上午,随着气温的回升冻层中的冰体开始消融,冻层的消融是在冻层的上下同时进行的. 随着地表的蒸发作用,上部消融层的土壤水分一部分向上运移消耗于蒸发,一部分向下下渗补给,处于中间的未解冻土层起到阻隔作用. 上部消融的土壤水由于受到该层的阻隔,与潜水无法连通,形成上层滞水,在0.4~0.6 m的土壤水分含量最高^[6, 16]. 在温度梯度的作用下,上层滞水转向表层迁移并快速蒸发,最终使得表层土壤含水量逐渐减少,低于20%. 4月19日上午土壤中的水分和盐分含量明显低于下午土壤中的水分盐分含量,且土壤体积含水量平均变化为15%,最大变化可达30%. 土壤盐分变化也有类似的趋势,消融期的土壤盐分含量大于冻结期的盐分含量,平均变化为 $0.1\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,最大变化可达 $0.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. 这种差别是日冻融循环造成的结果:下午太阳辐射比较强烈,使得表层土壤迅速消融,但由于检测的土壤冻结和融化的时间间隔比较短,所以水分的蒸发和下渗补给不明显,使得在日冻融循环中表层土壤含水量在融土中要明显高于冻土中的含水量.

土壤中水分既是盐分的溶剂,又是盐分运移的载体,从水分和盐分含量的变化趋势上可以得出,

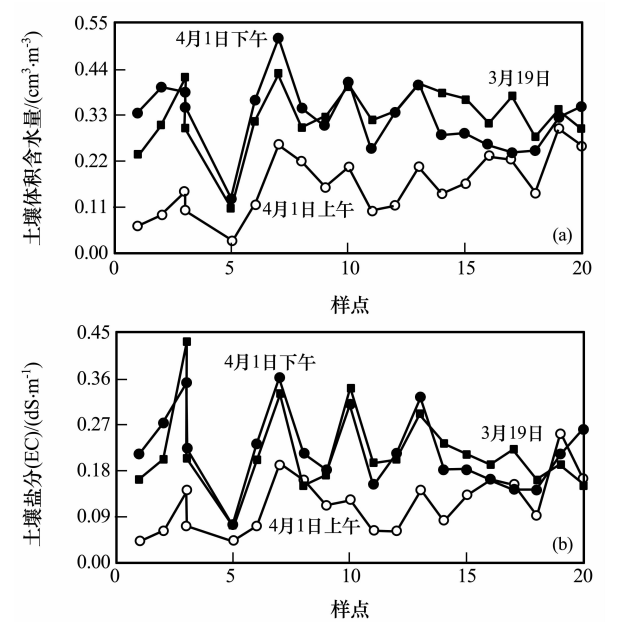


图6 Steven TDR测定的土壤水分和盐分变化
Fig. 6 Soil moisture (a) and salinity (b) of the 20 sampling sites determined with TDR

冻融过程中的水分运动在很大程度上决定着盐分迁移的方向和数量^[2]. 在冬季长期的冻结过程中盐分随着水分向冻层聚集,冻层以下土层及地下水中的盐分向冻层积累,多数盐分便随着土壤水冻结而累积于冻层内. 根据方汝林^[5]的研究结果,土壤在冻结的情况下,冻层内的盐分还有向冻层上部运移累积的趋势. 在土壤融冻期,土壤中盐分再一次重新分配,融化层盐分向上迁移,并随着土壤水分的蒸发在土壤表层积聚,使表土含盐量急剧增加,盐分主要集中于0~10 cm的土层中. 这与融冻期水分变化相一致,说明在水分变化的同时,盐分随水分而变化. 因此,冻结期是春季盐分累积的孕育期,融冻期是盐分的积累期.

3 结论

阿柔草场地地处西北高寒区,土壤在10月底至11月初开始冻结,翌年5月上、中旬才能消融,整个冻融期长达半年之久. 其中,解冻期大约从3月底4月初开始,历时1个月,形成了区域季节性冻融. 其土壤饱和溶液的电导率 EC_{SAT} 经试验测量计算为 $2.8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$,接近盐化土壤的临界值 $4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. 而冻融作用又是土壤盐碱化的一个特殊机制,冻融期土壤水分和盐分运移特点与非冻结期存在较大差异. 所以,加强土壤冻融水盐运移特征的试验研究,可以为阿柔草场土地盐碱化的防治及生态环境保护提供科学依据.

冻结期似冻层的水分不断向冻层运移,使冻层含水量达到最大,甚至达到饱和状态. 4月下旬,随着气温的回升冻层中的冰体开始消融,冻层的消融是在冻层的上下同时进行的. 随着地表的蒸发作用,上部消融层的土壤水分一部分向上运移消耗于蒸发,一部分向下下渗补给,下渗水分受到中间未解冻土层的阻隔形成上层滞水,在温度梯度的作用下,上层滞水又转向表层迁移并快速蒸发. 土壤中水分既是盐分的溶剂,又是盐分运移的载体. 水分的运动很大程度上决定着盐分迁移的方向和数量. 在冬季长期的冻结过程中盐分随着水分向冻层聚集,冻层以下土层及地下水中的盐分向冻层积累,多数盐分便随着土壤水冻结而累积于冻层内. 在土壤解冻期,土壤中盐分再一次重新分配,融化层盐分向上迁移,并随着土壤水分的蒸发在土壤表层积聚,使表土含盐量急剧增加,盐分主要集中于0~10 cm的土层中. 因此,阿柔草场解冻期盐分主要来源于冻结期冻层中的水盐累积.

冻层解冻后的土壤水分对阿柔草场牧草发育有着重要的生态意义, 由于冻层的存在导致上层滞水, 水分在土壤表面聚集, 而此时正是万物复苏时期, 也是牧草生长蓄水关键时期, 冻结层消融的水分, 增加了土壤含水量, 为牧草生长发育提供了较好的水分条件。但同时也存在不利的一面, 冻结期土壤水分带动盐分向上迁移, 使得盐分在土壤表层积聚, 导致土壤发生次生盐渍化。

参考文献(References):

- [1] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(9): 897—914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感-地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(9): 897—914.]
- [2] Zhang Dianfa, Zheng Qihong, Dong Zhiying. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, **25** (6): 14—18. [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.]
- [3] Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akai, *et al.* Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, **23** (4): 70—74. [李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J]. *农业工程学报*, 2007, **23** (4): 70—74.]
- [4] Li Weiqiang, Lei Yuping, Zhang Xiumei, *et al.* Study of water and salt migration in soil under concrete mulch during freezing/thawing period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23** (3): 251—257. [李伟强, 雷玉平, 张秀梅, 等. 硬壳覆盖条件下土壤冻融期水盐运动规律研究[J]. *冰川冻土*, 2001, **23** (3): 251—257.]
- [5] Fang Rulin. Primary study on dynamical regime of water and salt during the freezing and thawing period of soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, **19**(2): 164—172. [方汝林, 土壤冻结、消融期水盐动态初步研究[J]. *土壤学报*, 1982, **19**(2): 164—172.]
- [6] Zhang Dianfa, Wang Shijie. Mechanism of freeze-thaw action in land salinization process[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20** (6): 14—17. [张殿发, 王世杰. 土地盐碱化过程中的冻融作用机制[J]. *水土保持通报*, 2000, **20** (6): 14—17.]
- [7] Yang Yajie. Study on the issue of underground water in sodasaline soil of Songnen River plain[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2003(1): 15—17. [杨雅杰. 松嫩平原盐渍土地下水盐分动态变化及改良措施 [J]. *黑龙江农业科学*, 2003(1): 15—17.]
- [8] Wang Guoshang, Jin Huijun, Ling Qing. Application of time domain reflectometry (TDR) to determine parameters of frozen-unfrozen soils in cold regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(1): 88—92. [王国尚, 金会军, 林清. 时域反射仪在寒区冻融土参数测试中的应用[J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(1): 88—92.]
- [9] Wang Shaoling, Yang Meixue, Koike T, *et al.* Application of time domain reflectometer to research moisture variation in active layer on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **22** (1): 78—84. [王绍令, 杨梅学, 小池俊雄, 等. 时域反射仪在监测青藏高原活动层水分变化过程中的应用[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(1): 78—84.]
- [10] Lin Yicheng, Ding Nengfei, Fu Qinglin, *et al.* The measurement of electric conductivity in soil solution and analysis of its correlative factors[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2005, **17**(2): 83—86. [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.]
- [11] Wu Yuwei, Chen Tongquan. Empirical formulae for the determination of total salt content by electric conductivity of coastal saline soils in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1981, **7**(2): 125—128. [吴玉卫, 陈通权. 浙江省滨海盐土电导法测定全盐量的实验式 [J]. *浙江农业大学学报*, 1981, **7**(2): 125—128.]
- [12] Nadler A, Frenkel H. Determination of solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method [J]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1980, **44**: 1216—1221.
- [13] Nadler A. Field application of the four electrode technique for determining soil solution conductivity [J]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1981, **45**: 30—34.
- [14] Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, **31**: 213—237.
- [15] Wang W, Watanabe E, Kobayashi T, *et al.* A method for measuring soil solution electrical conductivity in the field using TDR[J]. *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, 2005, **18** (1): 55—63.
- [16] Zheng Dongmei, Xu Linshu, Luo Jinming, *et al.* Research on the water and salt dynamics in salinized wetlands of Songnen Plain during the freezing/thawing period [J]. *Wetland Science*, 2005, **3**(1): 48—53. [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[J]. *湿地科学*, 2005, **3**(1): 48—53.]

Analysis of the Variation Characteristics of Soil Moisture and Soil Salinity
——Take Arou Pasture in the Upper Reaches of Heihe River for an Example

WANG Wei-zhen, WU Yue-ru, JIN Rui, WANG Jian, CHE Tao
(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Freezing and thawing cycle of soil is a unique mechanism of soil salinization, which controls the soil salinity accumulation in spring. In the process of freezing-thawing, with the change of soil profile structure, three layers are formed. They are frozen layer, similar frozen layer and non-frozen layer. In this paper, the Arou pasture in the upper reaches of the Heihe River is taken for an example to study the variation characteristics of moisture and salt transportation. Arou pasture in the Qilian Mountains is a seasonal frozen area loca-

ted in the high-cold region in Northwest China. Owing to the freezing-thawing cycle, most parts of Arou pasture experience a special water and soil salinity transportation mechanisms: Moisture and salt move up to the freezing layer in the freezing time, making soil salinity content increase continuously, whereas in the thawing time moisture and salt move to the surface intensively due to evaporation. These lead to an intense salinity accumulation in the surface soil, which trigger the rising of salinity twice.

Key words: soil;freezing-thawing;soil moisture;soil salinity;migration