

# 膜下滴灌棉田冻融期土壤水分盐分变化特征

由国栋<sup>1,2</sup>, 虎胆·吐马尔白<sup>1</sup>, 邵丽盼·卡尔江<sup>1,3</sup>, 吴永涛<sup>1</sup>, 李卓然<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 山东省滨州市小开河引黄灌溉管理局, 山东 滨州 256600;

3. 新疆水利厅农牧区水利规划总站, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 通过分析 2014 年 11 月—2015 年 3 月北疆地区膜下滴灌棉田冻融期土壤盐分、水分与温度变化, 探讨了不同土层水热盐在冻融期的变化和耦合关系。结果表明: 冻融期土壤表层和深层含水量较高, 中间层含水量较低; 土壤剖面盐分在 0~80 cm 呈现层状分布, 浅层土壤发生盐分明显累积, 土壤盐分变异系数 20 cm 土层为 0.525、40 cm 土层为 0.257、80 cm 土层为 1.041。在冻融期, 土壤水分盐分沿剖面分布发生明显变化; 土水势梯度、土壤温度梯度是冻融期土壤水分盐分迁移的主要因素, 土壤水热盐之间变化具有高度的耦合性。

**关键词:** 滴灌棉田; 冻融期; 水分; 盐分; 变化特征

**中图分类号:** S152.7; S562.07; S151.9<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A

## Soil moisture and salinity changes in cotton field of drip irrigation during freeze-thaw period

YOU Guo-dong<sup>1,2</sup>, HUDan·Tumarerba<sup>1</sup>, XoLpan·KarJan<sup>1,3</sup>, WU Yong-tao<sup>1</sup>, LI Zhuo-ran<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservance and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xiaokaihe Bureau of Yellow River Diversion Irrigation Management, Binzhou, Shandong 256600, China;

3. Planning and Designing Bureau of Xinjiang Water Conservancy Station, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** The changes of soil salinity, moisture and temperature of film drip irrigation cotton field in north area from November 2014 to March 2015 were analyzed. Changes of soil water, heat and salt and their coupling relationship during freezing and thawing period were measured. The results revealed that during freezing and thawing period, the water content in the surface and deep soil was higher while middle layer had low water content. Degree of salinity increased with the soil depth, and was significantly enriched in surface soil. During freezing and thawing period, the distribution of water and salinity of soil profile was significantly changed. Soil water potential gradient and soil temperature gradient were the principal factors influencing soil water and salt migration, and soil water, heat and salt changed coordinately.

**Keywords:** drip irrigation; freezing and thawing period; moisture; salinity; variation

我国季节性冻土面积  $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>, 约占全国国土面积的 53.5%, 且大多分布于干旱、半干旱水资源短缺地区<sup>[2-3]</sup>。季节性冻融诱发春季土壤积盐, 危害农作物幼苗生长, 严重影响作物产量, 威胁干旱区农业可持续发展。研究冻融期土壤水盐运移规律及变化对农业生产具有重要的意义。冻融过程中水热盐的运移变化是非常复杂的, 已有研究表明, 我国北方冬季和春季土壤的冻融是土壤盐渍化的重要原因<sup>[4]</sup>。张殿发等<sup>[5-6]</sup>发现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。王璐璐、陈晓飞等<sup>[7-8]</sup>研究了不同植物养分对不同土壤冻融过程的影响, 采用 NMR 法对加入 5 种不同溶质的 4 种土壤的冻融特征曲线进行了测定与分析, Oliphant<sup>[9]</sup>在室内测定了不同质地冻土在温度梯度作用下的水分迁移, 发现在冻结锋面处迁移量十分显著。靳志峰等<sup>[10]</sup>通过研究得出冻融期气温对冻土的消融速度远远快于冻结速度。李瑞平<sup>[2,11]</sup>利用 SHAW 模型分析了季节性冻融期的土壤冻结融化过程、冻融期间水热迁移规律和不同初始含水率对冻融期的水热状

收稿日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51469033)

作者简介: 由国栋(1971—), 男, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉与土壤水盐运移理论。E-mail: dgyou7156@126.com。

通信作者: 虎胆·吐马尔白(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水盐运移理论及节水灌溉技术研究。E-mail: hudant@hotmail.com。

况的影响,得到了与水热迁移相关的物理量的动态变化规律。薛明霞<sup>[12]</sup>分析了不同地表条件下季节性冻融土壤的冻融特征。王子龙等<sup>[13]</sup>运用地统计学的理论与方法研究了季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征。本文以北疆地区膜下滴灌棉田为研究区域,通过冬季大田实验,分析冻融期土壤水热盐的变化特征及相互关系,为北疆地区春季土壤墒情诊断和农业发展提供技术支持。

## 1 试验条件与方法

### 1.1 试验条件

试验地在新疆生产建设兵团石河子市农八师121团,位于天山北麓、准噶尔盆地南缘,地处欧亚大陆腹地(44°46'55"N, 85°32'50"E, 平均海拔337.1 m)。该地区夏季炎热,冬季寒冷,温差大,常年干旱缺水,年降水量为141.8 mm,年蒸发量1660 mm,年均日照数约2862 h,具有典型的大陆性荒漠气候特点<sup>[14]</sup>。

试验区种植作物为棉花,灌溉制度相同,地下水埋深3 m左右。试验区土壤从11月23日开始进入冻结期至次年3月19日土壤消融。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。

### 1.2 试验方法

试验采用GPS定位,土钻取样,在试验区布置土壤温度监测系统,该系统采用全自动地温记录装置,地温采集器和取样深度设置为沿剖面深度依次为0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 cm。取样时间:2014年11月25日、12月23日,2015年3月9日、3月19日。土样在室内用烘箱在105℃条件下烘24 h,测量土壤含水率。将取回的土样碾碎,过1 mm的筛后配制土水比1:5的溶液置于三角瓶中浸泡30 min,为促进水溶性盐完全溶解,用全温震荡仪震荡5 min后静置6 h,用抽滤仪提取上层清液用DDJS-308A型电导仪测定土壤电导率。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融过程中土壤温度变化

从图1可知,表层土壤温度变化幅度大,在6:00之前土壤温度大于0℃,土壤处于微融状态,在6:00之后,土壤表层的热量被逐渐消耗,土壤温度低于0℃,土壤处于微冻状态;12:00后土壤温度又开始高于0℃,这是由于太阳辐射造成土壤温度的上升,最高达到3.6℃;表层土壤经历消融-冻结-再消融。在0~60 cm土层中,40 cm土层温度最低。

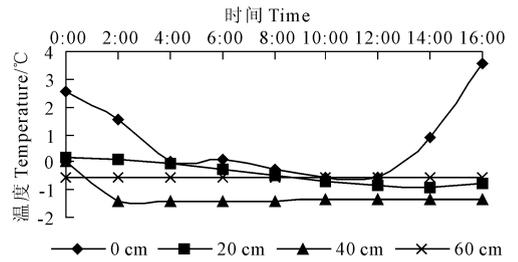


图1 冻融过程中土壤温度变化(3月20日)

Fig.1 The variation of soil temperatures

### 2.2 土壤水分、盐分与温度的耦合运移特征

冻结前(图2a),土壤剖面含水量呈现出随土壤深度的增加逐渐增加的趋势,60 cm以下土层土壤含水率较高;土壤盐分在0~60 cm土层含盐率变化较平缓,含盐率0.11%左右,土壤含盐率变化与土壤含水率变化趋势趋于一致,这是由于膜下滴灌棉田生育期灌水使土壤盐分向深层迁移,这个阶段土壤虽未出现冻结现象,但在土层中存在温度梯度,土壤水盐开始随着土壤温度变化发生迁移。

初冻期(图2b),温度梯度是导致土壤水分盐分运移的重要因素。随着气温的降低,表层土壤温度降到0℃以下,土壤开始冻结,冻结层水分结成冰,土水势降低,土壤吸力增大;相邻未冻层土水势相对增大,产生土水势梯度差,导致水分运动,土壤盐分随水分运动而向冻结层迁移。冻结层(0~20 cm)土壤水分、盐分明显高于相邻土层,土壤盐分与土壤水分变化趋势一致,随着土壤表层温度降低土壤盐分由未冻结层向冻结层迁移,说明温度梯度是土壤中水分盐分运移的驱动因素。

冻结期,外界环境温度较低,土层温度随着气温变化而变化,在土水势作用下,未冻层水分向冻结层流动,盐分随之迁移,导致盐分在土壤冻结层锋面产生累积,在冻结层20 cm处土壤盐分由未冻结前的0.17%增至稳定冻结后的0.22%,在冻结层锋面80 cm处土壤盐分的含量由冻结前0.19%增至冻结稳定后0.23%,在相邻冻结锋面的100 cm处土壤盐分由冻结前1.57%降为冻结稳定后0.83%,由此可见,在土壤冻结过程中,土壤盐分含量随着各土层冻结而增加;由图2c、2d可以看出土壤水分盐分在稳定冻结期变化趋势一致。盐随水移是土壤盐分运移变化主要形式,土壤中盐分运动变化趋势同土壤中水分运动的总趋势具有高度的协同性。

融解期(图2e),气温升高,土壤在表层和底部两个方向发生融解。随着气温的变化,表层土壤水分一部分被蒸发,一部分向下迁移到融化锋面,土壤处于反复冻融变化中。冻结期随水份迁移而累积在

土壤冻结层中的盐分,由于水分的蒸发而累积在表层,在 0~20 cm 土层土壤含盐率由冻结前 0.1% 增加到 0.28%,土壤产生春季返盐现象;在 20~40 cm 土层土壤盐分呈现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势,40~80 cm 土层土壤盐分随深度增加而逐渐增

加的波动趋势。在消融期,由于气温度升高快、蒸发强烈,在土壤表层产生积盐现象,中层土壤中盐分部分随着水分蒸发向上运移到土壤表层,部分随着水分下渗向下层土壤迁移,造成中层土壤盐分降低,深层土壤盐分增加。

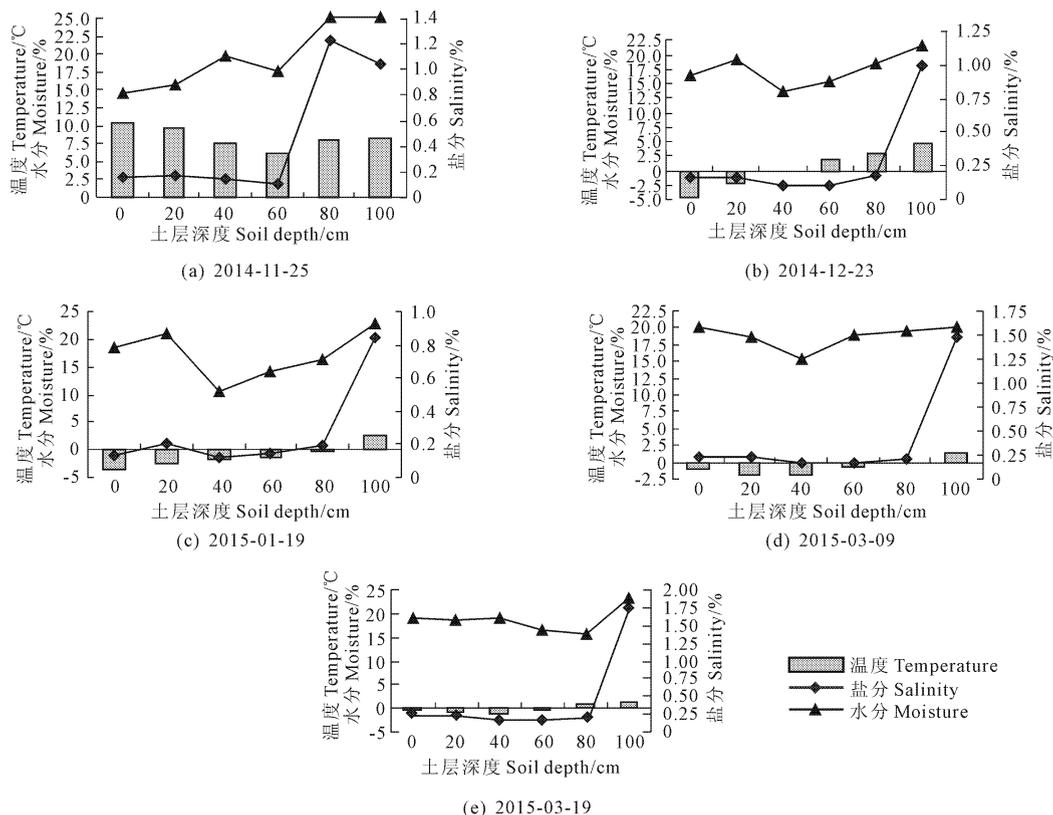


图 2 土壤水分、盐分与温度的关系

Fig.2 Relationships between soil moisture, salinity and temperature

### 2.3 土壤水分盐分的统计特征

土壤作为时间和空间上的连续体,其自然属性的变异是许多因素相互作用的结果,具有尺度上的相关性<sup>[15]</sup>。变异系数是描述变量特征的重要参数, $CV < 0.1$  为弱变异性, $0.1 \leq CV \leq 1$  为中等变异性, $CV > 1$  为强变异性,变异程度反映了不同土层土壤水分和盐分变异程度差异。为了便于分析各层土壤水分、盐分随时间的动态变化,利用统计分析方法计算土壤水分、盐分的均值、标准差、变异系数(标准差率)等统计特征值表征土壤水分盐分在冻融阶段的运移及变异特征,见表 1、表 2。

(1) 冻融期,在冻结和消融作用下,各层土壤水分变异系数均大于 0.1,土壤水分属于中等变异强度,水分变异系数沿剖面深度的增加呈现出先大后小的变化趋势,在 0~80 cm 土层中,变异系数由大到小的变化趋势依次是 80、0、60、40、20 cm。冻结过程中,土壤水分由非冻结带向冻结带迁移,水分大量

集中在冻结层峰面上,冻融期的土壤冻融的交替循环,水分蒸发和入渗使得土壤水分呈现出层状分布。

(2) 土壤盐分的变化趋势,在 0~60 cm 土层土壤盐分变异系数呈现出沿剖面深度的增加呈层状分布,浅层(0~20 cm)土壤盐分变异系数较大,40~60 cm 土层变异系数相对较小。气温对土壤温度的影响呈递减的趋势,在冻结过程中,土壤经历初期的冻融循环,冻结层自上向下发展,表层土壤处于冻融交替的状态,盐分随着水分运动不断向冻结层迁移。在融解期,随着气温和土壤温度的升高,土壤处于解冻状态,该时段外界气温升高快、气候干燥、蒸发强烈,浅层土壤盐分产生累积。80 cm 土层土壤盐分属于强变异程度,冻结过程中,该层土壤位于冻结带最下层,土壤中盐分在温度梯度和土水势的作用下由未冻结层向冻结层迁移,通过表 1 和表 2 发现土壤盐分变异程度在相同条件下高于水分的变异程度。

(3) 土壤水分盐分温度的相关性分析见表3。通过冻融过程中土壤水分、盐分和温度在不同土层相关性分析可知,在冻融期0~80 cm 土层土壤水分与盐

分呈正相关,土壤温度与土壤水分在0~20 cm 呈显著负相关;土壤温度与土壤盐分在0~60 cm 呈负相关。

表1 土壤盐分含量统计特征分析

Table 1 Statics of soil salinity contents

土层深度/cm Soil depth	数量 Number	均值 Mean	标准差 S	最小值 Min.	最大值 Max.	方差 $\delta^2$	峰度 Pc	偏度 Cs	变异系数 CV
0	25	0.1764	0.07291	0.09	0.34	0.005	-0.454	0.682	0.413
20	25	0.1792	0.09416	0.08	0.48	0.009	2.765	1.439	0.525
40	25	0.1276	0.03282	0.09	0.21	0.001	-0.014	0.677	0.257
60	25	0.1572	0.05350	0.10	0.34	0.003	4.883	1.883	0.340
80	25	0.4340	0.45182	0.11	1.93	0.204	3.957	1.952	1.041
100	25	0.8788	0.69881	0.09	2.26	0.488	-0.172	0.538	0.795

表2 土壤水分含量统计特征分析

Table 2 Statics of soil water contents

土层深度/cm Soil depth	数量 Number	均值 Mean	标准差 S	最小值 Min.	最大值 Max.	方差 $\delta^2$	峰度 Pc	偏度 Cs	变异系数 CV
0	25	0.18	0.06	0.11	0.41	0.004	8.12	2.38	0.35
20	25	0.17	0.03	0.10	0.22	0.001	-1.00	-0.12	0.20
40	25	0.17	0.04	0.08	0.25	0.002	-0.15	0.10	0.24
60	25	0.19	0.06	0.10	0.35	0.003	0.97	1.04	0.31
80	25	0.24	0.15	0.13	0.71	0.022	7.91	2.90	0.62
100	25	0.24	0.12	0.14	0.78	0.014	20.69	4.36	0.50

表3 土壤水分、盐分和温度 pearson 相关分析

Table 3 Correlation analysis of soil water, salt and temperature

项目 Item	0 cm			20 cm			40 cm		
	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature
盐分 Salinity	1			1			1		
水分 Moisture	0.558	1		0.491	1		0.687	1	
温度 Temperature	-0.35	-0.64	1	-0.550	-0.892	1	-0.065	0.557	1
项目 Item	60 cm			80 cm			100 cm		
	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature	盐分 Salinity	水分 Moisture	温度 Temperature
盐分 Salinity	1			1			1		
水分 Moisture	0.237	1		0.909*	1		-0.177	1	
温度 Temperature	-0.815	0.103	1	0.95*	0.91*	1	-0.568	0.602	1

注: \* 表示在0.05水平下相关显著。Note: \* were significantly correlated at 0.05 level.

## 2.4 冻融期土壤水分盐分的动态变化规律

冻融期土壤含盐量随着土壤温度梯度、土水势梯度的作用而迁移,采用冻前最低含水率 $\theta_1$ 、冻前最低含盐率 $S_1$ 、冻后稳定含水率 $\theta_2$ 、冻后稳定含盐率 $S_2$ 、消融时最高含水率 $\theta_3$ 、消融时最高含盐率 $S_3$ 表征各土层土壤含水量、含盐量的动态变化规律,如图3所示。不同特征含水量在垂向分布规律总体趋势相同,土壤含水率随着土层深度增加呈“S”型变化。在40 cm 土层处土壤含水率 $\theta_3 > \theta_2 > \theta_1$ ,冻结

期,在温度梯度的作用下,未冻层的水分不断向冻层运移;在冻胀的影响下土壤空隙体积增加,水分向空隙中运动使冻层含水量增加;消融期,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40~60 cm 土层的土壤水分

含量最高<sup>[16-17]</sup>。不同时期土壤盐分的变化不同,冻结前土壤盐分沿剖面深度增加而逐渐增加,冻融后土壤剖面含盐量表现为“积盐-脱盐-再积盐”变化规律,土壤盐分在冻融过程中的迁移是造成这种现象的主要原因。

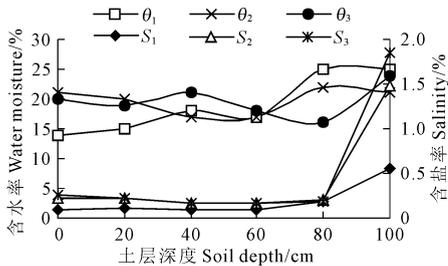


图 3 冻融期土壤水分盐分的动态变化

Fig. 3 Dynamic variation of soil water and salt during freeze-thaw

### 3 讨论

研究表明,在季节性冻融区,冻结过程中土壤水分在温度梯度和土水势梯度的共同作用下不断向冻结带迁移,土壤未冻结层中的水分向冻结层迁移,盐分随之运移并在冻结层中累积,80 cm 土层正处于冻结带锋面处,土壤水分和盐分的变异系数都比较高,土壤开始冻结引起冻结带水势降低,水分向冻层迁移,冻结层以下土壤中的盐分随着水分同步向上迁移,冻层土壤含盐量增加。冬季冻结过程中,盐分随着水分向冻层聚集,冻层以下土层盐分向冻层积累,消融期随着气温不断上升,冻结层不断消融,消融是在冻结层上下同时进行的,在地表的蒸发作用下,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。下渗部分水分由于受未解冻层的阻隔而形成滞水,在温度梯度作用下又向表层迁移并蒸发,盐分随着土壤水分蒸发而在土壤表层积聚,表土含盐量增加,主要集中在 0~20 cm 土层。冻融过程中土壤水分运动在很大程度上决定着土壤盐分迁移的方向和数量。冻融过程中土壤水分的运移趋势是自下而上运移,易引起土壤返盐,这与靳志峰<sup>[10]</sup>研究结果相同。

### 4 结论

1) 季节性冻融对土壤水分和盐分有着显著影响,土壤水分盐分呈正相关,各层土壤水盐变异程度不同,耕作层土壤盐分呈中等变异,表层盐分变异高。通过比较冻融期土壤水分和盐分的变异系数可知,各层土壤盐分的变异系数远大于水分的变异系数,说明在冻融期北疆膜下滴灌棉田土壤盐分运移机制要比水分复杂,今后,应当加强对盐分运移规律研究,探求土壤盐分的影响因素。

2) 在温度梯度和土水势梯度的共同作用下,土壤水分和盐分不断向表层迁移,冻结期发生土壤积盐过程。冻融期土壤中积盐较多,春季土壤表层返盐现象严重。冻融期土壤剖面盐分呈现出“积盐-脱盐-再积盐”变化规律。

3) 冻融期,土壤温度梯度是土壤水分盐分迁移的驱动力,冻结期土层自上向下冻结过程中,土壤水分向冻结层缓慢迁移,消融期,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,气温升高快,蒸发强烈,造成表层土壤盐分累积。土壤中盐分运动变化趋势同土壤中水分运动的总趋势及土壤温度的变化具有协同性。

### 参考文献:

- [1] 徐学祖,邓友生.冻土中水分迁移的实验研究[M].北京:科学出版社,1991:8-75.
- [2] 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.
- [3] 邓仁菊,杨万勤,张健,等.季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量变化[J].生态学报,2010,30(3):830-835.
- [4] 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):96-100.
- [5] 张殿发,郑琦宏.冻融条件下土壤水盐运移规律模拟研究[J].地理科学进展,2005,24(4):46-55.
- [6] 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.
- [7] 王璐璐,陈晓飞,马巍,等.不同土壤冻融特征曲线的研究[J].冰川冻土,2007,29(6):1004-1011.
- [8] 陈晓飞,都洋,马巍,等.养分含量对土壤冻融特征曲线的影响[J].冰川冻土,2004,26(4):440-448.
- [9] Oliphant, Nakano. Measurement of water migration due to a temperature gradient in frozen oil[C]//Permagraost: Fourth International Conference Proceedings. Washington. C. USA: National Academy Press, 1983:951-956.
- [10] 靳志峰,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.
- [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] 薛明霞.不同地表条件下季节性冻融土壤的冻融特征分析[J].山西水利科学,2008,(1):19-21.
- [13] 王子龙,付强,姜秋香,等.季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究[J].地理科学,2010,30(5):771-776.
- [14] 虎胆·吐马尔白,靳志峰,李文娟,等.北疆土壤温度变化对滴灌棉田水盐运移规律的影响研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):217-221.
- [15] 盛建东,杨玉玲,陈冰,等.土壤总盐、Ph 及总碱度空间变异特征研究[J].土壤,2005,37(1):69-73.
- [16] 张殿发,王世杰,等.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.
- [17] 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.