

秸秆覆盖秋浇后盐渍土壤冻融过程及水盐运移特征

梁建财^{1,2}, 史海滨², 李瑞平², 徐昭², 郑倩², 荆彦丽³

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 3. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为了探讨在寒旱盐灌区覆盖秋浇后冻融土壤的冻融特性及水热盐协同调控机制, 在盐渍土壤进行覆盖后秋浇田间冻融试验, 设5个处理, 秸秆覆盖量 1.2 kg/m² (F1.2)、秸秆覆盖量 0.9 kg/m² (F0.9)、秸秆覆盖量 0.6 kg/m² (F0.6)、秸秆覆盖量 0.3 kg/m² (F0.3)、未覆盖(CK)。结果表明: 秸秆覆盖影响了土壤冻结融化推进过程, 改变了土壤温度对气温变化的响应关系, 影响了水分、盐分在土壤剖面(特别是土壤表层和耕作层)的重新分配, 提高了翌年春季水分可利用量, 抑制了表层及耕作层春季返盐, 提高了秋浇的灌水效果。秸秆覆盖处理的最大冻结深度小于CK处理4~26 cm, 初冻时间滞后0~12 d, 融化时间滞后0~21 d; 秸秆覆盖的各处理由于覆盖层的存在, 消融水蒸发受到抑制, 表层积盐现象较弱; 消融期结束后, 在土壤表层0~10 cm, F0.9的土壤含水率最高, 处理F1.2较秋浇前脱盐率为81.18%, 脱盐效果最好; 在耕作层0~40 cm, F0.9的土壤含水率最高, 处理F0.6较秋浇前脱盐率为75.65%, 脱盐效果最好; 为保证在翌年春季播种的适宜含盐量及含水率, 以覆盖量0.6~0.9 kg/m²为宜。研究结果可为河套灌区秋浇制度的优化提供参考。

关键词: 河套灌区; 秸秆覆盖; 覆盖量; 冻融; 秋浇; 盐渍土

中图分类号: S152.7; S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0145-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.023

Salinized Soil Freeze-thaw Process and Water-salt Movement After the Autumn Irrigation with Straw Mulch

LIANG Jiancai^{1,2}, SHI Haibin², LI Ruiping², XU Zhao², ZHENG Qian², JING Yanli³

(1. College of Resource and Environmental Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2. Hydraulic and Civil Engineering college, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018; 3. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: Soil water and salt transfer are important processes under freezing-thawing conditions in nature. The effects of soil salt concentration on soil water and heat transfer have not been investigated thoroughly under freezing/thawing conditions. The freeze-thaw characteristics of salinized soil and the corresponding control mechanism of water-heat-salt after the mulched autumn irrigation in cold-drought-salt irrigation district were explored in the study. The field freeze-thaw experiment was conducted on the salinized soil after the mulched autumn irrigation with 5 treatments in terms of straw mulching quantity of 1.2 kg/m² (F1.2), 0.9 kg/m² (F0.9), 0.6 kg/m² (F0.6), 0.3 kg/m² (F0.3) and no mulching (CK). Results showed that: straw mulch promoted process of soil freeze-thaw, and changed the relationship between soil temperature and air temperature, resulting in the redistribution of water and salt in soil profiles, especially in the surface soil and tillage layer, which enhanced the available amount of spring water in the next year and restrained the spring salinification in surface soil and tillage layer, thus, the quality of autumn irrigation was improved. The maximum freezing depth of mulching was 4~26 cm smaller than CK, the initial freezing time and thawing time are lagged by 0~12 d and 0~21 d. The vaporization of melting water was restrained due to the straw mulch, which resulted weak surface salt accumulation. After the thawing period, the soil moisture

收稿日期: 2017-03-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(51369018); 山西农业大学科技创新基金项目(2015YJ13); 国家“十二五”科技支撑计划重点资助项目(2011BAD29B03)

第一作者: 梁建财(1983—), 男, 讲师, 主要从事盐碱地高效利用研究。E-mail: lj_c_2143@163.com

通信作者: 李瑞平(1973—), 男, 教授, 主要从事节水灌溉原理及技术研究。E-mail: nmglrp@163.com

content in F0.9 was the largest one in soil depth of 0~10 cm, and the F1.2 related ratio of desalinization was 81.18%, which was the best one among all the treatments. As for the tillage layer of 0~40 cm, the soil moisture content of F0.9 was the highest one and the best one desalinization occurred in F0.6, which was 75.65%. In order to ensure the appropriate salt content and water content in the coming year, the coverage amount of 0.6~0.9 kg/m² is the optimal one. The findings can be used to provide references for the optimization of autumn irrigation system in Hetao Irrigation District.

Keywords: Hetao Irrigation District; straw mulching; mulching quantity; freezing-thawing; autumn irrigation; salinized soil

冻土水盐运动的特殊规律与分配特性,是影响河套灌区土壤盐碱化发生、发展和演变的重要因素。土壤在冻结过程中,受温差影响,矿质化的潜水不断向冻土层迁移累积,同时盐分也随水分累积于冻土中,处于积盐状态,这是季节性冻土区盐碱地形成与变化的特殊成因之一^[1-2]。秋浇是内蒙古河套灌区经多年生产实践总结形成的一种秋季储水灌溉方式,其作用是冲洗压盐和为翌年春播及作物苗期储存水分。地表覆盖通过在地表设置一层不透气的膜或通透结构不同的层,改变了土壤表面与大气的接触,覆盖层改变了农田小气候和耕层土壤环境条件。根据研究显示秸秆覆盖可以抑制土面蒸发,起到蓄水保墒^[3-9]的作用,抑制盐分表聚^[10-18]使土壤表层含盐量降至作物耐盐度以内。

在国内农业冻土的相关研究中,彭振阳等^[19]基于田间监测研究了秋浇条件下季节性冻融土壤的盐分运动,邢述彦等^[20-22]进行了不同厚度秸秆覆盖处理在冻融期的土壤水分迁移试验,杨金凤等^[23]对地表覆盖条件下冻融土壤水热动态变化规律开展了相关研究。李瑞平等^[24-25]利用 SHAW 模型模拟研究了春播期和苗期土壤含水率以及含盐量随秋浇定额和秋浇时间的变化关系,根据春小麦播种和苗期需水、耐盐的要求,定量确定了不同盐渍化程度土壤的秋浇灌溉制度。纪永福等^[26]在河西走廊中部进行了解冻期麦草和沙子覆盖对土壤盐分和水分的影 响机理研究。

综上,关于覆盖下土壤冻融的相关研究,主要集中在覆盖下冻融期内的水、温、覆盖类型、入渗和灌水试验等,较少涉及到土壤盐分迁移,且在现有研究中较少涉及到水分、盐分的耦合作用。本研究在秋浇中结合秸秆覆盖,以无覆盖为对照,研究覆盖秋浇后盐渍土壤的冻融过程及水盐时空迁移规律,以期覆盖秋浇农艺节水技术的应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在内蒙古河套灌区沙壕渠试验站节水灌

溉研究基地进行。该试验基地位于内蒙古河套灌区中上游,研究区地处荒漠草原地带,属温带干旱气候,年平均气温 6.9℃,冬季严寒少雪,夏季高温干旱,年平均日照时数 3 189 h,平均降水量 142.1 mm,且集中在 7—8 月,年平均蒸发量 2 306.5 mm,蒸降比在 10 以上,11 月中下旬土壤开始冻结,冻土层厚度 0.8~1.3 m,3 月中旬冻土开始消融,5 月上、中旬冻土层全部消融,冻融历时 180 d 左右。

1.2 试验设计

该试验在 2013 年 10 月—2014 年 5 月冻融期间进行,设 5 个处理,3 个重复,其中 4 个玉米秸秆不同覆盖量处理:覆盖量 1.2 kg/m² (F1.2)、覆盖量 0.9 kg/m² (F0.9)、覆盖量 0.6 kg/m² (F0.6)、覆盖量 0.3 kg/m² (F0.3)、未覆盖 (CK)。玉米秸秆长 3~5 cm。小区规格 5 m×8 m,小区四周埋防侧渗塑料布,埋深 1.2 m。试验区土壤质地为粉砂壤土,属硫酸盐—氯化物型盐土,供试土壤(0—40 cm)的土壤全盐量平均值为 2.27 g/kg, pH 平均为 8.01。试验地 0—120 cm 土层平均土壤体积质量 1.51 g/cm³,田间持水率 24.16%,饱和含水率为 30.05%。

秋收翻地后,经平整、耙后,于 10 月 31 日覆秸秆,11 月 1 日秋浇,秋浇定额 150 mm。在整个冻融期内共计降水 19.6 mm。

1.3 测试指标

用 HS-300 动力取样器打孔测定冻结深度,取土测定土壤含水率和电导率。取样层次为 9 层:0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120 cm。

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-308A 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。

$$y = 1.687l + 0.038 \quad (1)$$

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

用 HTR-8 型温度记录仪测定土壤温度, 记录间隔为 60 min, 探头埋设层次同上。在试验区布置 2 眼地下水观测井, 井深为 4 m, 7 d 记录 1 次水位, 并同时取水样测定电导率。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 制图及数据整理, 采用 SUFER 8.0 软件进行网格化处理生成等值线图。

2 结果与分析

2.1 冻融期内地下水位及电导率的变化

试验区冻融期内地下水位及电导率动态变化如图 1 所示, 秋浇后地下水位上升明显, 随后开始下降。11 月中旬, 冻结前地下水埋深为 0.02 m, 在初冻期及冻结前期(11 月 21 日—1 月 2 日)地下水位下降较快, 下降速率为 0.043 m/d, 在冻结中后期(1 月 2 日—2 月 27 日)继续下降, 但下降速率放缓, 3 月 6 日地下水位达到最大深度, 为 2.31 m。在消融期(3 月 6 日—5 月 1 日)地下水位开始上升(上升速度 0.013 m/d)。在整个试验期地下水平均埋深为 1.56 m。地下水 EC 值在秋浇后至 11 月下旬迅速升高, 是因为秋浇水向下淋洗土壤盐分, 而使地下水 EC 值升高, 最高值为 5.70 mS/cm, 在初冻期随后降低, 在初冻期和冻结期内, 地下水电导率保持在 3.50~4.80 mS/cm。在 3 月上旬进入消融期后, 地下水电导率开始降低。在整个试验期地下水平均电导率值是 4.24 mS/cm。

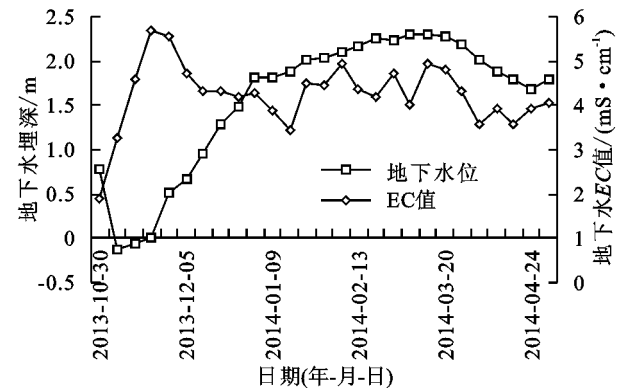


图 1 试验区观测井地下水位及电导率动态变化

2.2 不同覆盖量对土壤冻融特性的影响

2.2.1 地表温度与气温关系 地表负温强度是引起土壤冻结的根本原因, 土壤冻结深度与负积温的平方根成正比^[1]。在地表层, 地温的变化和气温变化关系密切, 在冬季, 地表温度随着气温的降低而降低, 并由于温度梯度向土壤下层传递。在冻结期气温负积温为-664.65℃·d。根据实测数据进行统计分析, 对各处理 2.5 cm 处地温负积温、气温负积温进行回归分析, 得到回归方程见表 1。

表 1 各处理 2.5 cm 处地温负积温与气温负积温相关性

处理	回归方程	R ²	负积温/(℃·d)
F1.2	Y=0.4999x+33.284	0.9710	-349.91
F0.9	Y=0.5427x+37.810	0.9718	-370.09
F0.6	Y=0.6054x+28.012	0.9780	-418.25
F0.3	Y=0.7158x+17.421	0.9892	-503.42
CK	Y=0.7400x+14.601	0.9907	-512.80

在回归方程中: Y 为 2.5 cm 处负积温(℃·d); x 为气温负积温(℃·d); R² 为决定系数。各回归方程的斜率大小表示了地温对气温变化的响应速率, 斜率值与秸秆覆盖量大小成反比, CK 最高。处理 F1.2、F0.9、F0.6、F0.3 地表负积温依次较 CK 降低了 162.89, 142.70, 194.55, 9.38℃·d。

2.2.2 盐渍土壤冻结温度 土的冻结或融化温度是判断冻结和融化深度的基本指标, 对于给定的土壤, 含水量、含盐量是影响其冻结及融化温度的主要因素。相关研究^[1-2,27]指出, 土壤含水量越小, 含盐量越大, 土壤冻结温度越低, 在含水量为 24% 的条件下, 当含盐量为 1.12 g/kg 时, 冻结温度为-0.15℃, 当含盐量为 3.78 g/kg 时, 冻结温度为-0.8℃。本试验在冻结期 0—120 cm 土层内土壤含盐量在 0.4~3.0 g/kg, 土壤含水量为 24%~73%, 参考以上研究结论, 可得出本试验土壤冻结温度为-0.8~0℃。本论文土壤冻结锋面的判断, 以实测地温数据为基础, 利用初始冻结温度等温线深度代替冻结锋面, 计算季节冻土层深度。以日平均气温达到-0.8~0℃的土层深度为冻结锋面, 相应日期为该土层的冻结日期, 并结合冻土取样时的实际冻融深度及取样日期进行验证。

2.2.3 不同处理的冻融过程 冻融期气温日变化见图 2, 10 月 24 日至 11 月 15 日, 日最低气温在 0℃以下, 但日平均气温在 0℃以上。11 月 16 日以后日平均气温稳定在 0℃以下, 1 月 3 日气温达到最低, 日最低气温为-24.60℃。3 月 9 日后日平均气温稳定在 0℃以上。冻融期内平均气温为-0.88℃。

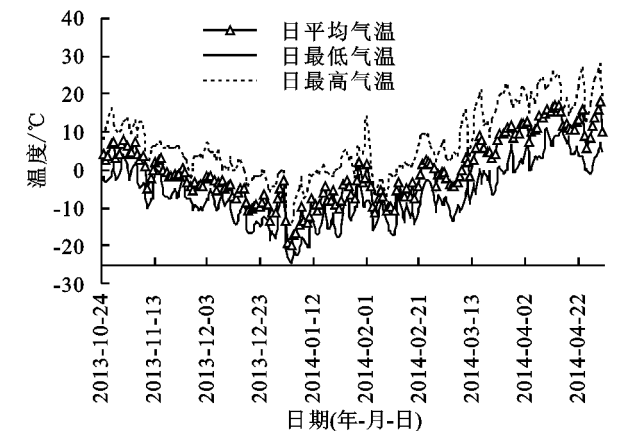


图 2 冻融期气温日变化

秋浇后初期,地表积水结冰而水面下地表并未冻结,11月14日,地表积水全部下渗及蒸发后,开始从地表向下冻结。不同处理冻结融化推进过程见图3,CK在11月14日开始冻结,2月17日达到最大冻深96 cm,3月10日从地表开始融化,解冻过程从地表和下部冻层两个方向进行,4月19日融通。处理F1.2、F0.9、F0.6、F0.3的最大冻深分别为70、75、90、92 cm,秸秆覆盖处理的最大冻结深度比CK小4~26 cm,初冻时间滞后0~12 d,融化时间滞后0~21 d。

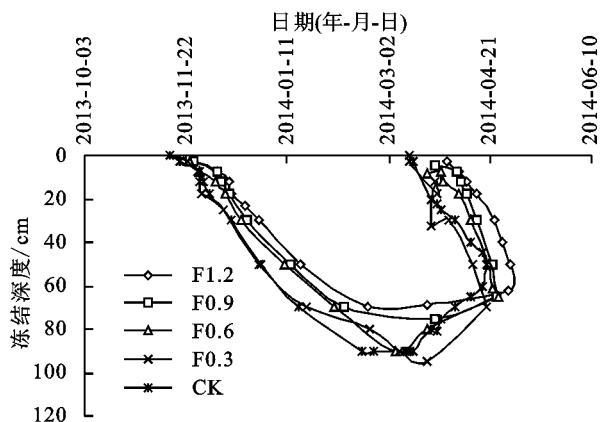


图3 不同处理土壤冻结融化推进过程

2.3 不同秸秆覆盖量处理下冻融期土壤水分时空变化

土壤表层0—10 cm含水率如图4a所示,在11月1日秋浇后,随着秋浇水入渗,0—120 cm内土壤剖面含水率快速升高,11月3日,土壤表层0—10 cm的含水率达到32.07%~44.68%,土壤水分达到超饱和状态,但同时重力水在重力作用下向下运动补给地下水,使在冻结前(11月23日)0—10 cm土层内土壤含水率较秋浇后有所降低。

11月14日以后,气温持续降低,在土壤表面的水分散失量很小,同时下层土壤水分在土水势和温差作用下向上补给,而使表层含水量增加,至12月下旬达到最大值为47.29%~57.18%。随后整体呈下降趋势,在消融后达到最低19.10%~29.81%。在整个冻融期内,秸秆覆盖处理的土壤表层含水率均值高于CK,F0.9最高为38.20%,CK平均含水率是32.06%。

3月21日,是河套灌区春小麦播期,秸秆覆盖处理表层含水率为25.92%~36.15%,其中处理F0.9最高,CK为26.52%。农田土壤适宜的水分含量决定于作物生长的需求,根据内蒙古河套灌区已有的研究成果,对于壤土,利于春小麦的适宜底墒范围为18%~20%,在3月21日,秸秆覆盖处理与CK含水率均偏高,不利于春小麦的播种和种子的萌发。消融后期,各处理表层含水率相比较,F0.9>F1.2>F0.6>F0.3>CK,土壤含水率分别为29.81%,27.69%,26.51%,22.97%,19.10%,处理F0.9最高。根据侯玉虹等^[28]的研究结论,对于壤土,

利于玉米出苗及苗期生长的适宜底墒范围为19%~22%,在4月24日,CK可以认为能满足玉米发芽的土壤水分需求,F0.3基本适合,而F0.9、F1.2、F0.6则需待0—10 cm土层中的超量水下渗或蒸发散失后,使其土壤含水量达到适宜播种的要求,从而使得玉米适宜播期延后。因此,秸秆覆盖后秋浇时,可考虑早秋浇或降低灌水定额。

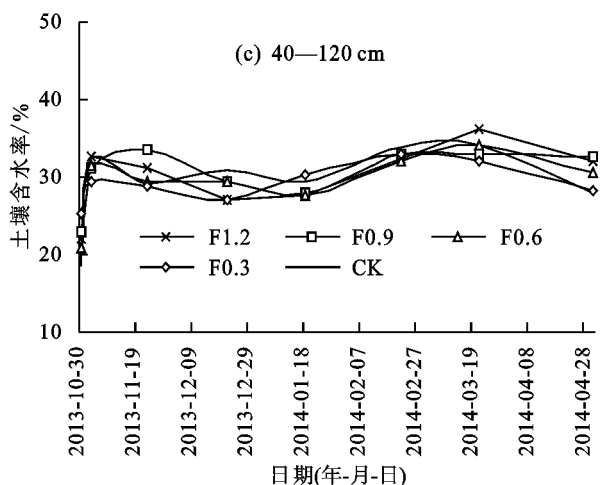
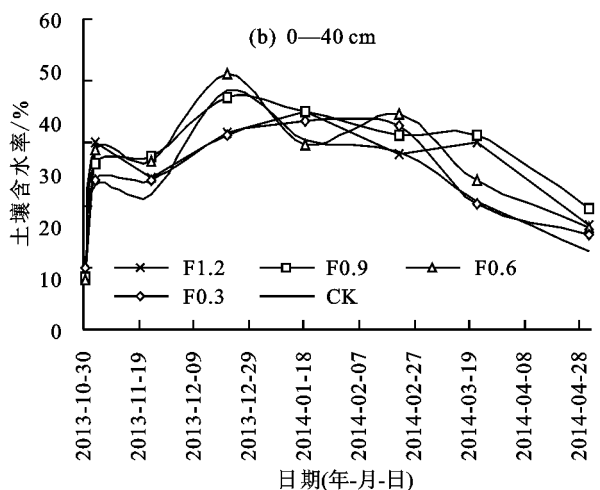
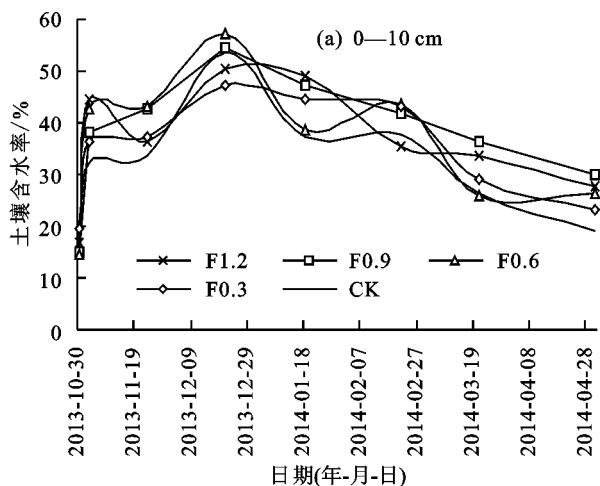


图4 不同处理在冻融期内各土层含水率变化

作物耕层0—40 cm深度内土壤平均含水率如图4b所示,秋浇后,随着秋浇水入渗,耕层土壤含水率

快速升高,11月3日,土壤耕层0—40 cm的含水率达到33.10%~40.18%,土壤水分呈超饱和状态,随后因重力水向下运动,使冻结前(11月23日)0—40 cm土层内土壤含水率较秋浇后降低。

11月14日以后,气温持续降低,同时下层土壤水分在土水势和温差作用下向上补给,而使耕层含水量增加,至12月下旬达到最大值为47.29%~57.18%。12月下旬以后,随着地下水位的持续下降和表层蒸发等因素,土壤耕层含水率整体呈下降趋势,在消融后达到最低。在整个冻融期内,秸秆覆盖处理的土壤表层含水率均值高于CK, F0.9最高为37.30%, CK平均含水率是33.08%。而在消融后各处理耕层土壤含水率相比较, $F0.9 > F1.2 > F0.6 > F0.3 > CK$, 土壤含水率分别为29.51%, 26.90%, 26.28%, 25.29%, 22.44%, 通过秸秆覆盖的抑蒸保墒作用,保证了土壤耕层0—40 cm较裸地有较高的土壤含水率,可以较好的满足小麦第一水(5月上中旬)和玉米第一水(5月下旬至6月上旬)前,小麦、玉米生育初期的需水。

土壤剖面40—120 cm深度内土壤平均含水率变化如图4c所示,各处理土壤含水率在整个冻融期内变化幅度较小,变化范围为27.12%~36.07%。在冻结期,土壤含水率呈缓慢增加趋势,水分的累积是由于地下水不断向上层补给并向冻结区迁移,但由于土壤冻结前水分没有全部下渗,秋浇后土壤水分很高,在冻结前土壤含水量达到35%~50%,导致冻结层增加容纳水量的能力有限,使得地下水对冻结层的补给量较小。在消融期,由于冻结水消融后下渗补给地下水,土壤含水量呈下降趋势。

消融后各覆盖处理0—120 cm土壤剖面含水率分布如图5所示,0—5 cm土层,秸秆覆盖处理含水率均值为26.05%,高于CK的17.18%。5—10 cm土层,秸秆覆盖处理含水率均值为27.44%,而CK是21.01%。10—15 cm土层,秸秆覆盖处理含水率均值为27.43%,而CK是24.12%。15—20 cm土层,秸秆覆盖处理含水率均值为25.78%,而CK是24.51%。20—40 cm土层,秸秆覆盖处理含水率均值为28.52%,而CK是28.73%。

由以上可得出,在耕层0—40 cm深度内,秸秆覆盖在冻融期的保墒效果从地表向下依次递减。在40—120 cm土层内,秸秆覆盖处理含水率均值为30.89%,而CK是28.07%。0—30 cm土层土壤含水率较低,在30 cm以下土层土壤含水率较高,但沿垂直方向变化不明显。

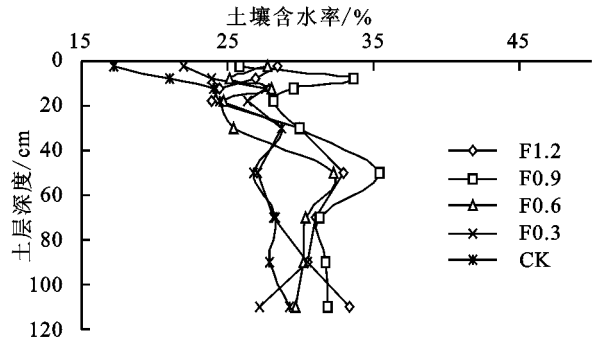


图5 消融后各覆盖处理土壤剖面(0—120 cm)含水率分布

2.4 不同秸秆覆盖量处理下冻融期土壤盐分时空变化

不同覆盖处理秋浇后冻融期土壤含盐量等值线图如图6所示,从图6中可以看出:

(1)秋浇是内蒙古河套灌区在特殊气候和土壤条件下形成的传统秋后淋盐、春季保墒的一种特殊的灌溉制度。在秋浇后至冻结前,蒸发作用小,由于淋洗作用,上层盐分脱盐,地表层0—10 cm土壤脱盐率高,各处理脱盐率为63.96%~85.99%。而对于耕层0—40 cm,脱盐率为47.79%~67.97%。大量盐分被淋洗至70 cm以下。(2)在冻结期,土壤在冻结过程中,盐分随着水分向冻土层迁移,冻结层盐分处于累积状态。在0—20 cm冻层,4个秸秆覆盖处理的含盐量在0.39~1.31 g/kg,而CK的含盐量在1.35~1.76 g/kg,覆盖处理含盐量值低于CK,是由于采取了覆盖措施。CK由于地表蒸发作用,在0—20 cm处形成聚盐区。随着地表负积温的累积,冻结锋面向下发展,地下水向冻层补水的渗径也在不断减小,下部土层积水积盐,在40—90 cm处形成聚盐区。(3)在消融期,秸秆覆盖的各处理由于覆盖层的存在,消融水蒸发受到抑制,表层积盐现象较弱,消融期内0—10 cm土层积盐率为14.07%~57.37%。而处理CK,在土壤开始消融后,随融水蒸发,融层的盐分向地表聚积,释水返盐,消融期内0—10 cm土层积盐率达114.59%,出现了春季强烈返盐。在春小麦播期,秸秆覆盖处理地表0—10 cm土层含盐量为0.56~1.36 g/kg, CK为1.38 g/kg,均满足春小麦耐盐极限^[1,24-25](地表0—10 cm土层含盐量小于2 g/kg)这一要求。土壤消融后期,由于冻结层土壤含水量较高,达到35%~50%,消融速度快,在消融水回渗补给地下水过程中,消融水淋洗原冻结层盐分,融层的中下部出现了脱盐现象。(4)冻融期结束后,处理F1.2、F0.9、F0.6、F0.3、CK的0—10 cm土壤平均含盐量分别为:0.66, 0.78, 0.92, 2.17, 2.83 g/kg。在地表0—10 cm范围内,各处理在消融后较秋浇前均表现为脱盐,处理F1.2脱盐率为81.18%,其脱盐效果最好。

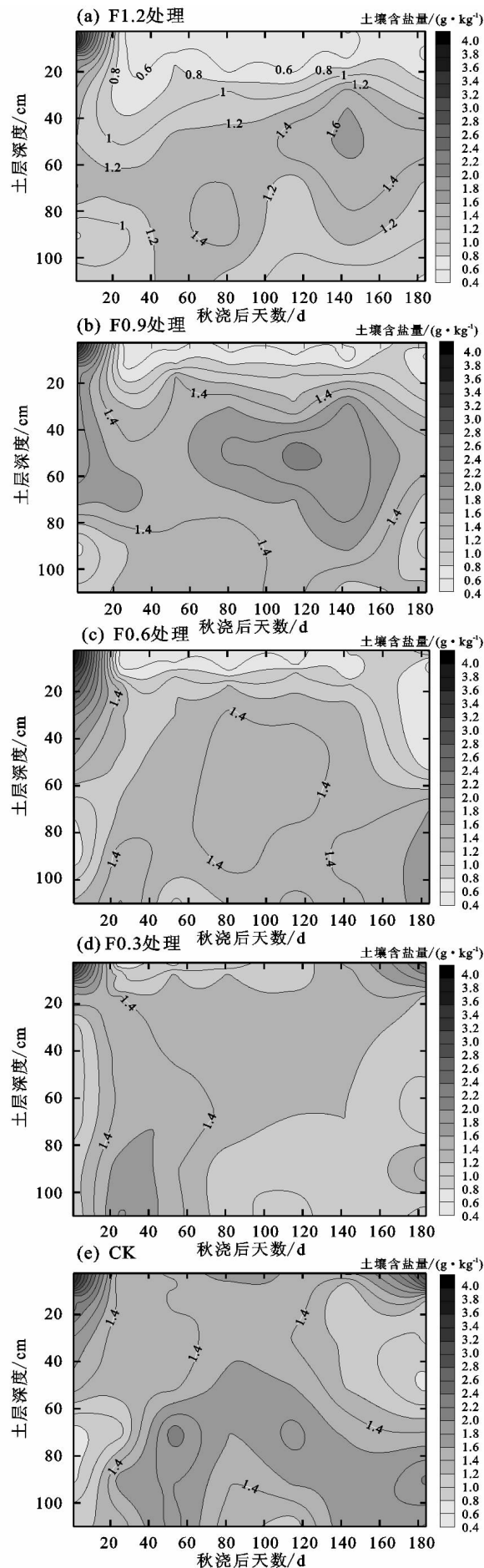


图 6 不同覆盖处理秋浇后冻融期土壤含盐量时空变化

3 讨论

秸秆层阻碍了土壤大气间的物质和能量交换, 秸秆层抑制了土壤热量的散失, 也阻碍了太阳辐射进入土壤^[29]。各处理覆盖层厚度不同, 这种阻碍作用存在差异, 地温对气温变化响应速率与覆盖量大小成反比, 各处理的冻融进程、冻结深度等冻融特性并不一致。冻层的消融是在冻层的上下同时进行的, 处于中间的未解冻土层起着隔水作用, 上部消融的土壤水由于受到该层的阻隔, 形成上层滞水, 随着地表的蒸发作用, 上部消融层的上层滞水向上运移消耗于蒸发^[30]。在消融初期消融后多余水下渗, 在冻层上形成临时的含水层, 此部分水量如耕作措施适当, 则会满足春播及幼苗生长需要^[1], 因此, 秸秆覆盖后秋浇, 秸秆层可抑制上层土壤这部分消融水的无效蒸发, 同时可以有效抑制表层积盐。在非冻融期秸秆覆盖的相关研究中^[6-8, 15], 秸秆覆盖可以显著提高土壤的含水量, 且有随秸秆覆盖量的增加而提高的趋势。但在本研究中, 不同秸秆覆盖量处理间, 土壤表层 0—10 cm, 土壤耕层 0—40 cm 的冻融期含水率变化差异, 处理 F0.9 的土壤含水量高于处理 F1.2, 秸秆覆盖的蓄水保墒效应与覆盖量不成正比关系, 与邢述彦等^[20]的研究结果类似。

研究者们普遍认为^[31-33], 在冻结期, 地下水浅埋地区, 地下水补给冻结层, 下部冻结层补给上部冻结层, 土壤盐分随水分向上部运动, 而导致积水积盐。本研究中, 在冻结中后期, 土壤表层 0—10 cm 和耕作层 0—40 cm 土壤含水率有缓慢下降的趋势, 这与上述研究结果不一致, 主要是由于秋浇后至冻结前, 地下水位较高, 大量土壤上层水分并未及时下渗, 达到超饱和状态, 因此在冻结中后期, 地下水位下降明显, 土壤上层未冻水在土水势驱动下, 从上向下排水, 故上层土壤含水量下降。

4 结论

(1) 地表负积温是引起土壤冻结的根本原因, 土壤表层 2.5 cm 处地温负积温对气温负积温的响应速率, 与秸秆覆盖量大小成反比, CK 最快。秸秆覆盖影响了土壤冻结融化推进过程, 秸秆覆盖处理的最大冻结深度小于 CK 处理 4~26 cm, 初冻时间滞后 0~12 d, 融化时间滞后 0~21 d。

(2) 对于土壤表层 0—10 cm 和耕作层 0—40 cm 范围内, 各处理在消融后各处理含水率相比较, F0.9 的土壤含水率最高。各处理在消融后较秋浇前均表现为脱盐来看, 处理 F1.2 在表层脱盐率为 81.18%, 脱盐效果最好。处理 F0.6 在耕作层脱盐率为 75.65%, 脱盐效果最好。

(3) 综上, 通过分析不同秸秆覆盖量处理对土壤冻结及融化过程和水分盐分在剖面上重新分配的影响, 对覆盖秋浇后翌年春播时土壤表层和耕作层的水盐响应关系, 在河套灌区盐碱耕地进行覆盖秋浇的适宜秸秆覆盖量, 以覆盖量 $0.6 \sim 0.9 \text{ kg/m}^2$ 为宜。

参考文献:

- [1] 王伦平, 陈亚新, 曹国芳, 等. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 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.
- [3] 高茂盛, 温晓霞, 黄灵丹, 等. 耕作和秸秆覆盖对苹果园土壤水分及养分的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 547-555.
- [4] Li S X, Wang Z H, Li S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(2): 39-49.
- [5] Liu Y, Li S Q, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in springy maize fields subjected to different water management practices on the loess plateau[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 769-775.
- [6] 杨东, 李新举, 王梅. 秸秆覆盖对滨海盐渍土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 159-164.
- [7] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 238-243.
- [8] 方文松, 朱自玺, 刘荣花, 等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 123-128.
- [9] Ji S N, Unger P W. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 442-448.
- [10] 刘广明, 杨劲松, 吕真真, 等. 不同调控措施对轻中度盐碱土壤的改良增产效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 164-169.
- [11] 赵文举, 马宏, 范严伟, 等. 不同覆盖模式下砂壤土水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 331-336.
- [12] 孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 246-25.
- [13] 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对新疆棉田水热盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114-120.
- [14] 毕远杰, 王全九, 雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油菜产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(s1): 83-89.
- [15] 邓力群, 陈铭达, 刘兆普, 等. 地面覆盖对盐渍土水热盐运动及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 93-97.
- [16] 曹晋军, 刘永忠, 李万星, 等. 不同覆盖方式对土壤水热状况和玉米水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 107-111.
- [17] Kaya M D, Okcu G, Atak M, et al. Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(4): 291-295.
- [18] 姚荣江, 杨劲松, 赵秀芳, 等. 水盐调控措施对苏北海涂油葵生长及土壤盐分分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 5-9.
- [19] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77-81.
- [20] 邢述彦, 郑秀清, 陈军锋. 秸秆覆盖对冻融期土壤墒情影响试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 90-94.
- [21] 郑秀清, 樊贵盛, 邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [22] 陈军锋, 郑秀清, 秦作栋, 等. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 102-110.
- [23] 杨金凤, 郑秀清, 邢述彦. 地表覆盖条件下冻融土壤水热动态变化规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(3): 303-305.
- [24] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.
- [25] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 403-412.
- [26] 纪永福, 蒯海明, 杨自辉, 等. 解冻期覆盖盐渍土地表对土壤盐分和水分的的影响[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 17-23.
- [27] 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.
- [28] 侯玉虹, 尹光华, 刘作新, 等. 土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(1): 70-73.
- [29] 付强, 马梓粟, 李天霄, 等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 152-159.
- [30] 李瑞平, 史海滨, 张晓红, 等. 基于小波变换的最大冻深期气温与土壤水盐变化分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 82-87.
- [31] 张浩, 李志华, 何蛟涛, 等. 干旱区盐渍土形成和水盐运移机理[J]. 生物学通报, 2011, 46(4): 10-12.
- [32] 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.
- [33] 常龙艳, 戴长雷, 商允虎, 等. 冻融和非冻融条件下包气带土壤墒情垂向变化的试验与分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1031-1041.