

## 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究

李瑞平<sup>1</sup>, 史海滨<sup>1\*</sup>, 赤江刚夫<sup>2</sup>, 张艺强<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 日本冈山大学环境理工学部, 冈山, 700-85303, 日本;  
3. 内蒙古河套灌区解放闸管理局沙壕渠试验站, 杭锦旗 015400)

**摘要:** 在中国西北干旱、寒冷地区, 冻融作用是土壤盐碱化独特的形成机制。该文以内蒙古河套灌区为例, 基于田间实测资料, 对土壤冻融期间多年水分、盐分和温度的变化规律进行分析。研究结果表明: 不同土层各个年度的土壤温度变化规律基本一致, 土壤温度的变化滞后于气温的变化, 而且滞后时间随着土层深度的增大而增大; 气温的降低引起了土壤温度的降低, 从而引起水分和盐分的迁移; 盐分的时间变异系数(0.30~0.85)大于水分的变异系数(0.02~0.40), 说明盐分的运移机制比水分运移机制复杂。该研究结果为河套灌区冻融土壤水热盐耦合模拟的研究和秋浇制度的制定提供了基础理论依据。

**关键词:** 河套灌区; 冻融土壤; 水盐; 耦合运移; 秋浇

**中图分类号:** S152.7; S152.8

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-6819(2007)4-0070-05

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.

Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akae, 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. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

土壤冻融是一个非常复杂的过程, 它伴随物理、物理化学、力学的现象和子过程, 主要包括水分、热量的传输、水分相变和盐分的积聚。据统计, 全球陆地面积 70% 存在冻土, 其中 14% 为永久冻土, 56% 为季节冻土; 中国是世界上第三冻土大国, 其中多年冻土分布面积为  $2.068 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 21.5%, 季节性冻土分布面积很广, 为  $5.137 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 53.5%, 两者合计约占全国总面积的 3/4 左右<sup>[1]</sup>。

中国季节性冻土主要分布在北纬 30° 以北地区, 而这些地区又大多属于干旱、半干旱的缺水地区。在干旱、寒冷气候条件以及地下水埋深较浅与矿化度较高的自然条件下, 土壤冻融所造成的盐碱化对作物的危害十分严重<sup>[2,3]</sup>。内蒙古河套灌区是典型的季节性冻土区, 该地区农业生产以秋季储水灌溉冲洗盐分为主要手段。秋季储水灌溉(简称秋浇)是该地区多年生产实践获得的传统技术, 一方面用于冲洗土壤盐分, 另一方面也为翌年春播储存水分<sup>[4,5]</sup>。如何保存和利用秋浇后冬季冻结时土壤表层的水分, 减少春旱程度, 并且尽量降低盐害, 同时达到节约用水的目标, 是一个亟待解决的关键技术问题。国内关于冻土的研究始于 20 世纪 80 年代, 由当时中科院冰川冻土所徐学祖等重点对冻胀及盐胀等问题进行了室内实验研究<sup>[6]</sup>; 到 90 年代初, 黄兴发在中科院禹城综合试验站研究了裸地与地膜覆盖地冻融期土

壤的水分、温度和盐分的变化过程<sup>[7]</sup>; 太原理工大学郑秀清、樊贵盛等对冻融土壤水分入渗特性的影响因素进行了试验研究<sup>[8-12]</sup>。针对冻融土壤水盐迁移机理的研究也较多<sup>[13-18]</sup>。但是冻融条件下盐分随水分迁移的内在机制研究, 目前国内外都处于探索阶段。与秋季储水灌溉制度相结合, 探讨研究秋浇后冻融期间土壤水分、盐分和温度(土壤温度和气温)的动态变化规律的成果少见报道。

本文以内蒙古河套灌区上游较典型的试验区域——沙壕渠灌域为研究对象, 基于土壤越冬期间水分、盐分和温度的实地监测数据, 对冻融期间多年水分、盐分和温度运移特征进行分析, 探讨秋季储水灌溉后冻融土壤水、热、盐三者耦合运移的特殊规律, 为下一步河套灌区秋浇灌水定额的合理化、节水改造和盐碱化防治提供科学的理论依据。

### 1 试验概述

试验区沙壕渠试验站位于内蒙古河套灌区西北部, 隶属于解放闸灌域, 冬季严寒少雪、夏季高温干热, 在水文地质、土壤质地、水盐、地下水状况方面都具有良好的代表性。试验区总控制面积  $4.93 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 其中灌溉面积  $3.47 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 年平均气温  $6.3 \sim 7.7^\circ\text{C}$ , 年均降水量 138.2 mm, 年均蒸发量 2096.4 mm。土壤冻结始于每年 11 月中、下旬, 冻土层厚度 1.0~1.3 m, 冻层全部消融在 5 月上、中旬, 冻融历时 180 d 左右。

冻土定点水、热、盐监测试验于 1994~2006 年的 11 月上旬至翌年 5 月进行。土壤温度采用温度传感器自动采集, 土壤水分、盐分分别在土壤冻结初期、冻结期和融解期 3 个时期采样测定。试验中主要考虑测定精度, 冻融土壤含水率测定采用土钻取土(冻结期采用人工操作的机械土钻)、烘箱烘干、称重的方法测定。土壤盐分(电导率)采用 1:5 土水混合提取液测 EC 值。采样土层为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120、130、140、150、175、200、225、250 cm。为了进一步研究 0~40 cm 土层内水分、盐分、温度三者之间的变化情况, 在 1999~2001 年 3 个越冬

收稿日期: 2006-04-12 修订日期: 2006-11-25

基金项目: 内蒙古自然科学基金重点项目(200508010303)

作者简介: 李瑞平(1973-), 男, 汉族, 内蒙古呼和浩特市人, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: nmglrp@163.com

\*通讯作者: 史海滨(1961-), 男, 汉族, 山西太谷人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: shi\_haibin@sohu.com

期间进行了 0~ 40 cm 土层内的定点监测, 采样深度为 5、10、15、20、25、30、35、40 cm。

### 2 结果与分析

#### 2.1 气温与土壤温度的变化特征分析

从不同年度冻融期不同土层土壤温度变化过程曲线(图 1)可以看出, 不同土层各个年度的土壤温度变化规律基本一致。因此可以选择 2005~ 2006 年的日最低气温与土壤温度随时间的

变化过程来进行分析(图 2)。

从图 1、2 中可以看出, 在整个冻融期间, 气温与土壤温度的变化趋势一致。深层土壤温度变化较平缓, 而浅层(10 cm、30 cm)土壤温度受气温影响变化剧烈, 10 cm 深处土壤温度变幅为 19.95℃, 而地表下 80 cm 深处变幅为 10.25℃。但是气温的变化不会立即对土壤温度产生影响, 而是滞后一定的时间, 且滞后时间随土壤深度的增大而增大, 因而持续时间较短的表面温度波动对深层土壤温度不会产生大的影响。

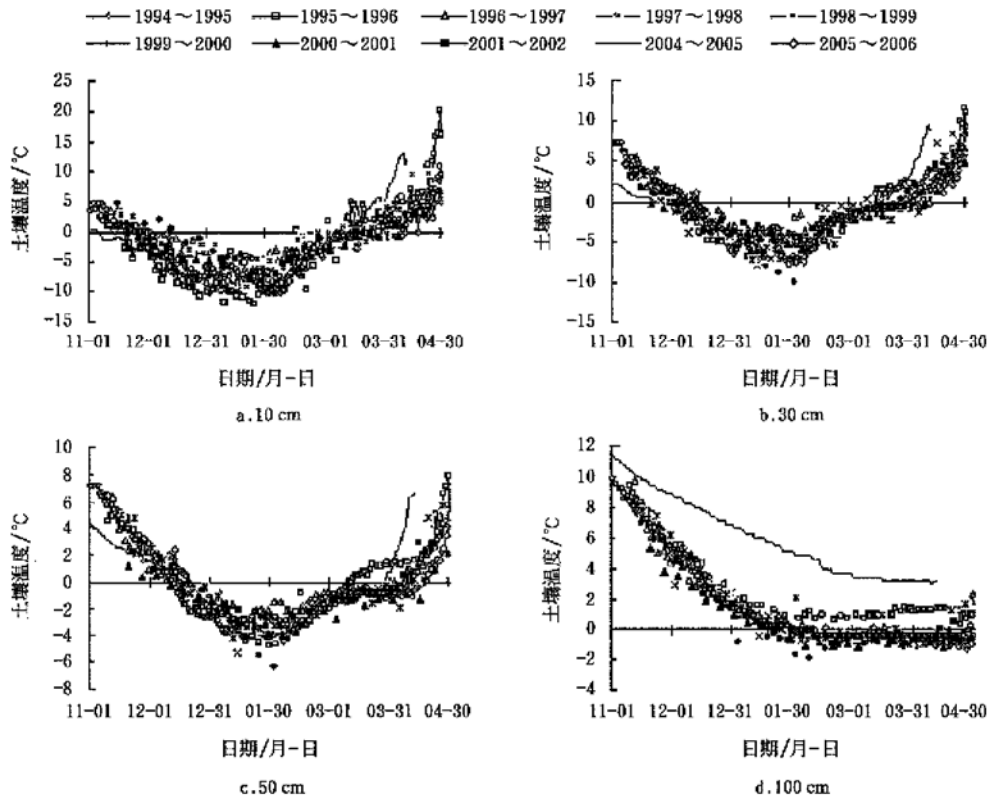


图 1 不同年度冻融期不同土层土壤温度变化

Fig. 1 Variation of soil temperature at different soil layers during freezing and thawing period in different years

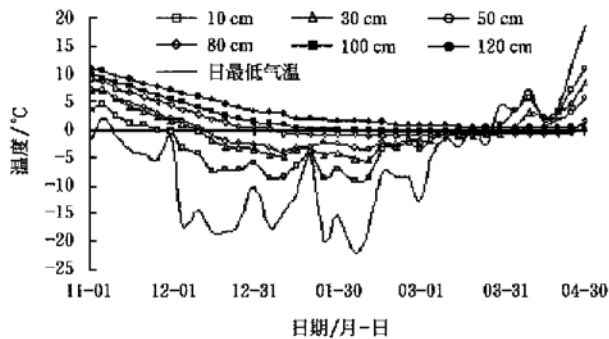


图 2 冻融期气温和土壤温度的变化(2005~ 2006 年)

Fig. 2 Variation of air temperature and soil temperature during freezing and thawing period(2005~ 2006)

#### 2.2 冻融过程中土体剖面特征

随着气温的逐渐下降, 当土壤温度低于土壤冻结温度时, 土

壤开始冻结。在整个 11 月下旬至翌年 3 月上旬期间, 土壤温度自表层向下呈递增变化趋势, 土体自上而下出现了较大的温度梯度。在此期间, 冻土层厚度也随着时间的推移而逐渐加大。到 3 月下旬表层土壤温度上升到 0℃, 冻结土壤开始融化。在表层冻结土壤融化的过程中, 受冻结层的影响, 底部冻结锋面仍然在向下发展, 5 月上旬冻结土壤全部融通。

从图 3 中可以看出, 初冻期(12 月)冻结厚度较浅约为 20 cm, 而且由于白天气温仍在 0℃以上, 冻层白天消融夜间冻结, 是一个非稳定冻结阶段。在此之后, 土壤冻结深度随气温持续的降低而加深。冻结期(翌年 2 月), 在气温达最大负温后, 土壤冻结速度减小, 冻结深度增加缓慢, 冻层厚度约为 100 cm。融解期(翌年 4 月)却出现了上下融化中间冻结的现象, 同时下部土壤冻结锋面仍然向下发展, 达到 120 cm。土壤在冻结情况下, 受低温冰冻的影响, 使土壤水分状态发生很大的变化, 将土壤剖面分为冻结层、似冻层和非冻层 3 部分。因此, 在消融期土壤剖面具有 2 个似冻层。

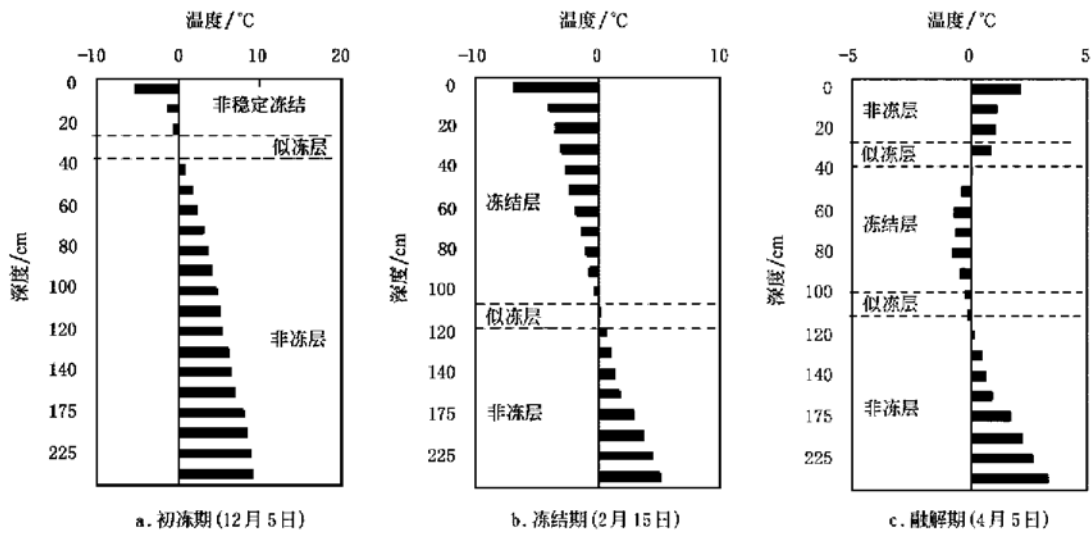


图3 土体剖面冻融特征(1997~1998年)

Fig. 3 Freezing and thawing characteristics of soil profile (1997~1998)

2.3 日最低气温对冻融土壤水盐运移的影响

图4为1994~2005年冻融期日最低气温天数比例分布。从图4中可以看出,1995、1999、2002年度冻融期间气温低于0℃的

天数比例高于其他年度的比例,并且1999、2002和2005年度出现了少量低于-20℃的情况。图5为冻结期和融解期水分盐分在不同年度的比较。从图5中可知,1995、1999和2002年度0~

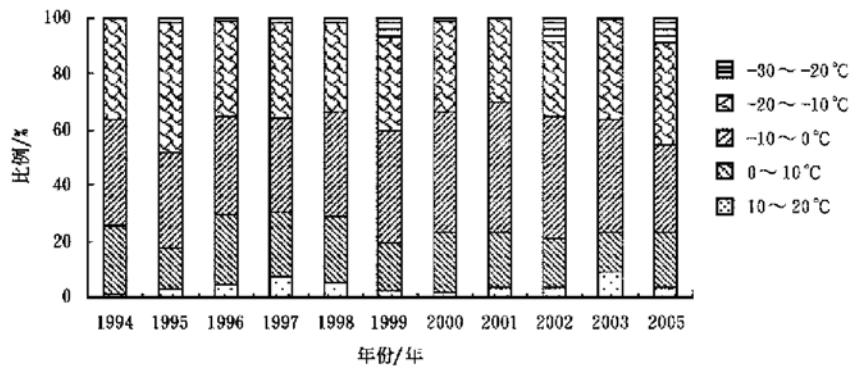


图4 1994~2005年冻融期日最低气温天数比例分布

Fig. 4 Distribution of days for minimum daily air temperature during freezing and thawing period from 1994 to 2005

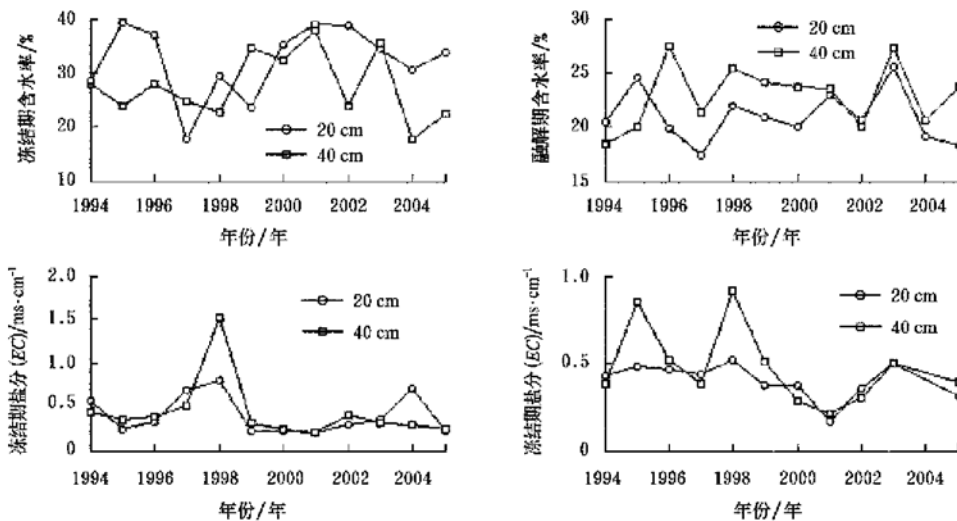


图5 1994~2005年冻融期水分和盐分变化

Fig. 5 Variation of soil moisture and salt during freezing and thawing period from 1994 to 2005

40 cm 土层内冻结期间含水率变化可达 16%, 而其他年度为 10%, 融解期间含水率的变化却仅为 8.0% 左右。因此可以说明气温的降低引起了土壤温度的降低, 形成一个地温梯度, 从而引起水分的迁移。同样盐分在 1995 年度融解期的变化也较大。图 5 中 1998 年度盐分含量及变化均较大, 可能是由于 1998 年是丰水年, 地下水位较高所致。

#### 2.4 土壤水分与盐分时间变异特征

利用经典统计分析方法对不同土层水分、盐分的均值、标准

差、变异系数等统计特征值进行分析。其中变异系数  $C_v$  反映了水分和盐分的时间变异程度。从 1994~2005 年度不同土层水分盐分的变异系数  $C_v$  (图 6) 可以看出, 冻结期和融解期表层水分的变异系数  $C_v$  为 0.3, 属于中等变异程度, 而 40 cm 以下土层水分的变异系数  $C_v$  小于 0.10, 属于弱变异程度。但是盐分表现为较强变异性, 特别是 50~100 cm 处变异系数  $C_v$  达到 0.85。进一步说明冻融土壤盐分运移的机制要比水分运移机制复杂的多。

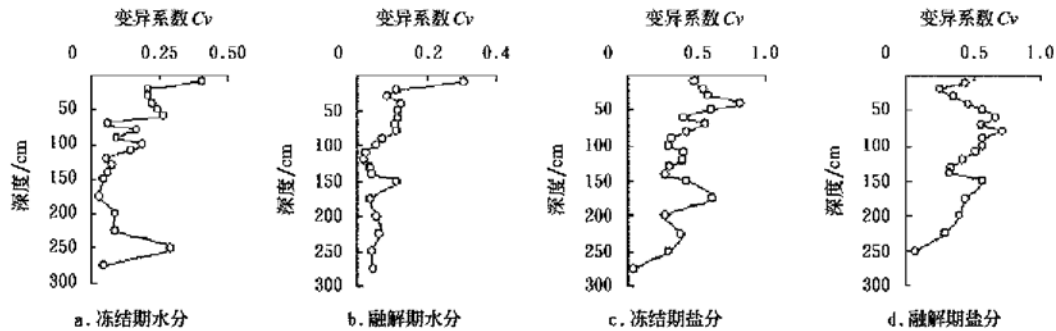


图 6 冻融期水分和盐分的时间变异特征

Fig. 6 Temporal variability of soil moisture and salt during freezing and thawing period

### 3 结论

通过以上分析, 可以看出不同土层各个年度土壤温度变化规律基本一致, 土壤温度的变化滞后于气温的变化, 且滞后时间随着土层深度的增大而增大; 多年资料分析表明气温的降低引起了土壤温度的降低, 形成一个地温梯度, 从而引起水分与盐分的迁移; 冻融期盐分的时间变异系数  $C_v$  要大于水分的变异系数, 盐分变异系数  $C_v$  为 0.5 左右, 最大为 0.85, 而水分的变异系数  $C_v$  只有表层较大(0.3), 40 cm 以下土层水分的变异系数  $C_v$  小于 0.10, 说明盐分的运移机制比水分运移机制复杂。

秋浇是河套灌区传统的秋后淋盐、春季保墒的一种特殊的灌水制度, 它有正面的淋盐保墒效益, 但如果灌水定额过大时, 不仅浪费水量, 而且造成土壤潮塌翻浆现象, 影响春季作物播种。因此, 对于河套灌区, 满足节水、调盐、保墒多重目标的秋浇灌水制度还需要从田间试验和数学模型方面进一步深入研究。

#### [参 考 文 献]

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

[2] 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, 2005, 13(3): 298-302.

[3] 龚家栋, 祁旭升, 谢忠奎, 等. 季节性冻融对土壤水分的作用及其在农业生产中的意义[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 328-333.

[4] ShiHaibin, AkaeTakeo, NagahoriKinzo, et al. Simulation of leaching requirement for Hetao Irrigation District considering salt redistribution after irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 67-72.

[5] Wang Liping, Takeo AKAE. Analysis of ground freezing process by unfrozen water content obtained from TDR data in Hetao

Irrigation District of China[J]. Jpn Soc Soil Phys, 2004, 98, 11-19.

[6] 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, 4, 1-134.

[7] 黄兴发, 王 千, 曾德超. 冻期土壤水热盐运动规律的实验研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(3): 28-33.

[8] 樊贵盛, 贾宏骥, 李海燕. 影响冻融土壤水分入渗特性主要因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 88-94.

[9] 郑秀清, 樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 52-55.

[10] 邢述彦. 灌溉水温对冻融土入渗规律的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 41-44.

[11] 陈军锋, 郑秀清, 邢述彦, 等. 地表覆膜对季节性冻融土壤入渗规律的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 18-21.

[12] 樊贵盛, 郑秀清, 赵生义. 地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 1999, (3): 21-26.

[13] 张立新, 徐学祖, 韩文玉. 景电灌区次生盐渍化土壤冻融特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 512-516.

[14] 李述训, 程国栋, 刘继民, 等. 兰州黄土在冻融过程中水热输运实验研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 320-324.

[15] 杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 553-558.

[16] 荆继红, 韩双平, 王新忠, 等. 冻结-冻融过程中水分运移机理[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 50-54.

[17] Zhang Dianfa, Wang Shijie. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in the north China[J]. Environmental Geology, 2001, (41): 96-100.

[18] Anatoli Brouchkov. Salt and water transfer in frozen soils induced by gradients of temperature and salt content [J]. Permafrost periglacial processes, 2000, (11): 153-160.

## Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period

Li Ruiping<sup>1</sup>, Shi Haibin<sup>1\*</sup>, Takeo Akae<sup>2</sup>, Zhang yiqiang<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China; 2. Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama 700-8530, Japan; 3. Inner Mongolia Hetao Irrigation Region Jiefangzha Department, Hangjin Houqi Inner Mongolia 015400, China)

**Abstract:** Freezing and thawing action is a particular mechanism of soil salinization in the northwestern arid and cold area. Taking Inner Mongolia Hetao Irrigation District as an example, based on the observed field data, the variation laws of soil temperature, soil moisture and soil salt during freezing and thawing period were analyzed. Results show that the variation laws of soil temperature at the different soil layers are consistent. Variation of soil temperature lags to air temperature. With the soil depth increasing, lag interval increases also. Decrease of air temperature results in that of soil temperature, which leads to water and salt transfer. Temporal variability coefficient of salt (0.30~0.85) is larger than that of water (0.02~0.40). Salt transfer mechanism is more complex than water transfer mechanism. Research provides the foundation for the water-heat-salt coupling simulation on freezing-thawing soils and the establishment of autumn irrigation schedule in Hetao Irrigation District.

**key words:** Hetao Irrigation District; freezing and thawing soils; water-salt; coupling transfer; autumn irrigation