

# 黄河上游盐渍化农田土壤水盐动态变化规律研究

吴月茹<sup>1</sup>, 王维真<sup>1</sup>, 王海兵<sup>1</sup>, 张智慧<sup>1</sup>, 刘树宝<sup>2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 内蒙古筑业工程勘察设计有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔盟 022150)

**摘要:** 土壤含水量和可溶解盐分浓度的测定, 对了解土壤盐分的分布及移动具有重要意义。但如何在作物生长不同时期, 对耕作区的土壤含水量及可溶解盐分浓度进行同时连续测量? 是了解土壤盐分分布及动态变化规律的关键。该文将 TDR 测量的土壤含水量及体积电导率结合起来推算土壤溶液电导率及饱和溶液电导率, 对黄河上游盐渍化农田的土壤水盐动态变化特征进行了相关分析, 为土壤水盐动态研究提供了一种新的方法。研究结果表明, 地下水位在年内总体埋深较浅, 小于 150 cm; 10 cm 深度土壤含水量在时间变化上呈现递减趋势, 年内变化范围为 20% ~ 45% (不包括土壤冻融期), 20, 40, 60 cm 深度土壤含水量年内变化较复杂, 波动范围为 33% ~ 50%, 垂向分布表现为下层高于上层; 与土壤水分相反, 土壤盐分表现为上层高于下层。在整个作物生长季节, 土壤 10 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  多数时间分别在 10 ~ 15 dS/m 和 5 ~ 10 dS/m 范围内波动, 高于盐化和非盐化土壤分类标准 4 dS/m。土壤 20, 40 cm 深度的盐分变化规律同样较上层 10 cm 复杂, 盐分浓度在时间序列上呈现出大小交替变化的特点。

**关键词:** TDR; 电导率; 土壤含水量; 土壤盐分

**中图分类号:** S151.9; S153.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2010)03-0080-05

## Study on Soil Moisture and Salt Dynamic Variation of Saline Farmland in Upper Reaches of Yellow River

WU Yue-ru<sup>1</sup>, WANG Wei-zhen<sup>1</sup>, WANG Hai-bing<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-hui<sup>1</sup>, LIU Shu-bao<sup>2</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou, Gansu 730000;  
2. Inner Mongolia Building Engineering Survey and Design Company, Hulunbeier, Inner Mongoli 022150)

**Abstract:** The movement of soluble salts in soil is directly related to the movement of soil water, therefore, how to simultaneous and continuous determine the soil water and soluble soil salt content in cultivated soil layer, which is key for understanding the distribution of soil salinity and dynamic variation law. This paper combined soil water content and soil bulk electrical conductivity measured by Time Domain Reflectometry continuously, to calculate electrical conductivity of soil solution ( $EC_w$ ) and electrical conductivity of saturated soils solution ( $EC_{sat}$ ), both are closely related to soil soluble salt concentration, then analysis the dynamic change feature of soil water and salt, which is a new method. The analysis results indicated that groundwater level kept low value in one year, low than 150 cm. Soil water content in 10 cm decreased with time in our observation periods(except the soil frozen-thaw time), ranging from 20% to 45%. The variation character of soil water in 20, 40, 60 cm, which range from 33% to 50%, were relatively complicated. Vertically, soil water content was high in upper layer than in lower layer. Contrary to soil water, soil salt content appeared decreasing trend from the soil surface layer to deeper layer. In the most time of crop grown season, the  $EC_w$  and  $EC_{sat}$  in 10 cm fluctuated respectively in range of 10 ~ 15 dS/m and 5 ~ 10 dS/m, high then the classification criteria 4 dS/m between saline soil and non-saline soil. Compared with the soil salt change rule in 10 cm, it was still complex in 20, 40 cm, which characterized by alternating high and low values.

**Key words:** TDR; electrical conductivity; soil water content; soil salt

收稿日期: 2010-02-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421305); 国家自然科学基金项目(40875006); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2- XB2-09-01); 欧盟第七框架项目 CEOP-AEGIS(FP7-ENV-2007-1 Grant nr. 212921)

作者简介: 吴月茹(1983-), 女, 内蒙古兴和县人, 博士生, 主要从事遥感反演土壤盐分研究。E-mail: wuyue\_qr @ 163.com

通讯作者: 王维真(1967-), 男, 山西万荣人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 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

随着人类文明的发展,耕地减少、土壤退化已经成为人类面临的重大威胁,盐碱地和土壤次生盐渍化问题已经严重影响到农业生产和生态环境的可持续发展。很大一部分由于扩大灌溉面积而增加的产量,也被土壤盐碱化带来的损失而抵消,特别是在干旱半干旱地区<sup>[1]</sup>。因此对灌溉农田的水盐动态进行定位试验研究,探索农田的水盐动态变化规律是确定合理的灌排制度、实现干旱区灌溉农业可持续发展的基础,同时也可以为次生盐渍化的防止提供科学依据。以往主要将土壤全盐量作为作物的耐盐指标,但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<sup>[2]</sup>,常使用的量化指标为土壤溶液电导率,因为土壤溶液电导率和土壤可溶解盐分浓度极度相关<sup>[3]</sup>。测定土壤溶液电导率已有一些方法报道<sup>[4,5]</sup>。

如何在作物生长不同时期,对耕作区的土壤含水量和可溶解的土壤盐分浓度进行同时连续测量?是了解土壤盐分分布及动态变化规律的关键。近年来发展迅速的 TDR(Time Domain Reflectometry,时域反射仪)法在测定土壤含水量的同时,还可得到土壤的体积电导率<sup>[6,7]</sup>,进而精确推算土壤溶液的盐分浓度<sup>[8]</sup>。TDR 用于溶质的测定是最近几年才开展起来<sup>[9]</sup>。溶质运移理论的研究应从封闭的室内土柱试验扩展到野外大田观测,使理论研究和生产实际问题联系更加紧密<sup>[10]</sup>。国内此项工作还处于起步阶段<sup>[11]</sup>。本文结合 TDR 测量的土壤含水量及体积电导率推算土壤溶液电导率及饱和溶液电导率,对黄河上游盐渍化农田的土壤水盐动态变化特征进行了相关分析,为土壤水盐动态研究提供了一种新的方法。

## 1 试验区基本情况

表1 试验区土壤颗粒组成

粒级/ mm	颗粒组成百分比/ %				土粒密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度
	<0.002	0.002~0.075	0.075~0.25	>0.25			
P1	14.9	74.2	10.9	0	2.71	1.6	0.41
P3	14.7	72.1	13.2	0	2.68	1.52	0.43

试验区位于黄河上游的冲积河谷地段,地属甘肃白银靖远县,土壤盐渍化程度较高。受半干旱大陆季

风气候影响,气候干热,蒸发量远大于降水量,多年平均气温为 8.9℃,多年平均降水量为 238.3 mm,降水主要集中在 7、8 月。土壤物理属性见表 1,85% 的土壤直径小于 0.075 mm,容易发生盐化。试验区设置了常规气象观测站,观测变量包括温度、湿度、风速、风向、以及辐射,降水和多层土壤温度等气象和水文要素。另设置了 3 个 TDR 土壤观测点,同步测量土壤的介电常数及体积电导率,用来实时连续的监测土壤水分和盐分变化。观测点 P1 和 P3 处按 3 层深度埋设,分别为 10、20、40 cm;P2 点处按 4 层深度埋设,增加了 60 cm。各层探头水平插入土壤中,尽量减少对土壤原状的扰动。气象及水文观测开始于 2007 年 9 月,对土壤的介电常数及体积电导率每 30 min 进行 1 次的连续测量。

## 2 试验方法

(1) 土壤水分:采用经典 Topp 公式<sup>[12]</sup>:  $\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3$  (0.6),来计算土壤水分含量。式中:  $\epsilon$  为土壤的介电常数;  $\theta$  为土壤的体积含水量。

(2) 土壤溶液电导率:使用相关物理经验模型<sup>[13,14]</sup>,可以对某一土壤在测得土壤体积电导率和土壤水分含量时估计土壤溶液电导率,而土壤溶液电导率与土壤盐分浓度密切相关。具体为对  $EC_w$  在不同的含水量下作一系列的  $EC_w$  和  $EC_a$  的关系曲线<sup>[13]</sup>,一般是在一定  $EC_w$  下制备已知浓度的  $EC_w$ ,用 TDR 测量  $EC_a$ 。

根据室内试验,确立了模型中的有关参数,建立了土壤体积电导率,土壤溶液电导率和土壤水分含量三者的关系式:  $EC_a = EC_w (1.941 - 0.211) + 0.64(0.15 < \theta < 0.4, 0.7 \text{ dS/m} < EC_a < 3.0 \text{ dS/m})$ 。

(3) 土壤饱和溶液电导率:根区层内土壤总的可溶解盐分  $EC_{sat}$  由下式定义<sup>[15]</sup>:  $EC_{sat} = (\theta / \theta_s) EC_w$ ,式中  $\theta_s$  是土壤孔隙度,这是一个表示土壤盐分含量可溶于土壤溶液中的函数。

## 3 结果与分析

### 3.1 地下水位的季节变化

盐渍土的形成与地下水位高低和矿化度大小密切相关,一般,地下水位越高,潜水蒸发量越大,土壤表层容易积盐。土壤中的可溶解盐分既能随土壤水分的蒸发在土壤表层积聚,又可以随着水分入渗至土壤下层或排出。地下水位也处于动态平衡之中,这种动态变化与土壤盐分变化密切相关,却又非同步升降。当降雨或灌溉时,地下水位升高,但同时土壤盐分又被淋溶,此后随着排水和蒸发,地下水位开始回降,土壤因蒸发而开始积盐,土壤积盐的过程发生在地下水位从高到低的回落过程中,直至水位降至临界深度以下。因此,水位回降越慢,土壤积盐越多。

地下水位埋深与年总降水量的多少、年内大气降水分配、植物蒸散、地表蒸发、作物灌溉时间及地下水开采程度等因素有关,其中降水与灌溉是影响地下水位埋深的主要因素<sup>[16]</sup>。图 1 给出了试验样地内两眼观测井的地下水位随时间变化曲线,同时也给出了同期对应的降水分布(整体较小)。受灌溉、降水及蒸发的共同作用,地下水位在年内呈现“多峰”变化过程,总体埋深较浅,观测井 1 年内变幅约为 90 cm,地下水位埋深最大为 128 cm,最小为 38 cm。观测井 4 年内变幅约为 116 cm,地下水位埋深范围为 24~140 cm 之间。从年内作物生育期地下水位的变化情况来看,地下水位随时间变化总体上呈现逐渐抬升的趋势。

### 3.2 土壤体积含水量( )季节性变化

图 2 给出了利用 TDR 测得的不同深度土壤含水量在 2007 年 9 月 19 日至 2008 年 9 月 23 日的变化,其中,土壤含水量为不同观测点的平均值。

由图 2 可见,土壤冻结前(12 月前),10 cm 深度土壤水分呈现逐渐下降的趋势,变化范围为 36%~42%,20,40,60 cm 深度则基本保持稳定不变的状态,数值维持在 41%~45%左右,下层略高于上层。12 月初,由于温度的降低,土壤表层开始发生冻结,冻结深度随着时间的推移逐渐加深。土壤水分逐渐降低,并在土壤完全冻结的时候达到最小值,约为 10%左右。土壤完全冻结分别在不同的时间到达土壤各层次,10 cm 深度的土壤最早冻结完全,土壤水分在 1 月初最先降到最小值;20 cm 深度土壤冻结完全的时间稍晚于 10 cm 深度;40 cm 深度则是在 2 月中旬冻结完全。2 月下旬,气温回升,进入土壤的解冻期。土壤消融是从冻结土体的上部和下部同时消融的,但土壤冻结深度一般在 80~100 cm<sup>[17]</sup>,所以在本试验数据中,只能反映出土壤从上部消融的情形。而在整个土壤冻融期间,60 cm 深度的土壤水分含量较高,即使在土壤完全冻结状态下,其最小值仍然维持在 35%左右。土壤消融之后及整个作物生长季节(3 月下旬到 9 月下旬),20,40,60 cm 深度的土壤水分变化具有类似的趋势:减小增加再减小。40 cm 和 60 cm 深度的变化曲线几乎重合,土壤水分含量变化幅度范围为 40%~50%;20 cm 深度的土壤水分含量略低,在 33%~45%之间波动;而 10 cm 深度土壤水分整体呈现下降趋势,且水分含量相对较低,维持在 20%~30%之间变动。

在整个时间序列上,土壤水分含量在垂向上的分布整体表现为下层高于上层,其原因为毛管力的作用下,土壤水分不断向地表运移,受到地表土壤及植被(作物生长季节)的蒸散发作用,上层土壤水分不断损耗,导致其含量小于土壤剖面下层。

### 3.3 土壤溶液电导率及饱和溶液电导率的季节变化

土壤溶液电导率  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  是根据 TDR 同时测得的土壤含水量及体积电导率计算得到,具体公式见第 2 章节。当土壤中的水分含量及电导率太大或太小,超出某一阈值范围时,计算得到的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  并不可靠,甚至根本无法用其计算  $EC_w$  和  $EC_{sat}$ ,如在土壤冻融期间,就无法得到  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值。另外,  $EC_w$  指一定土壤水分条件下土壤孔隙水的电导率,而  $EC_{sat}$  代表当土壤溶液达到饱和状态时土壤中可溶解盐分中离子的电导率。所以当土壤水分含量较高,接近饱和状态时,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值基本相等,其变化曲线重合。选取观测点 P1 处的土壤  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  随时间变化关系进行土壤盐分动态变化分析。

2007 年 9 月 19 日到 10 月 19 日期间,在秋季灌溉淋溶的作用下,10 cm 深度土壤中的盐分随着灌溉水的淋洗,逐渐向土壤深层渗透,土壤盐分以向下迁移为主,使其含量在上层逐渐减小,表现为强烈的脱盐状态,土壤  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  整体呈现

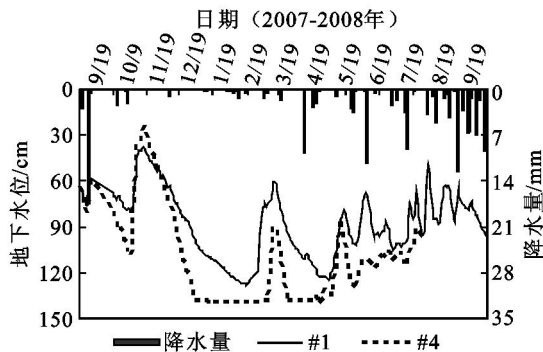


图 1 地下水位及降雨的年内变化

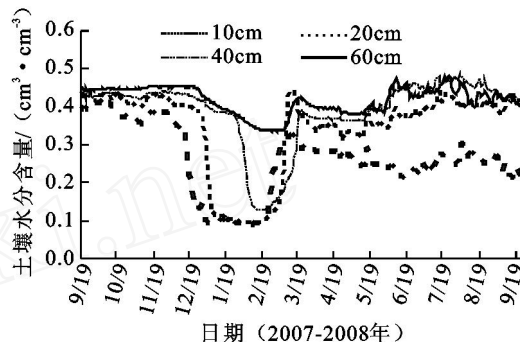


图 2 不同深度土壤体积含水量季节性变化

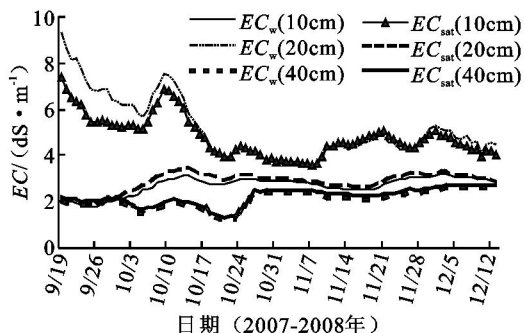


图 3 不同深度土壤  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  随时间变化关系

下降趋势。而 20 cm 深度的土壤则以积盐为主,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  呈现上升趋势。10 月 19 日到 12 月 13 日期间, 土壤盐分整体处于动态平衡状态, 其中, 10 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  在 4~5 dS/m 之间微小变动, 20 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值略高于 2 dS/m。从 9 月下旬开始到 12 月中旬, 40 cm 深度的土壤盐分一直处于动态平衡,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值变化甚微, 维持在 2 dS/m 左右。从垂向上来看, 土壤剖面中上层的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值要高于下层(图 3)。

由图 4 可知, 在作物生长初期(5 月 1 日到 6 月中旬), 气温逐渐回升, 而期间降雨量依然很小, 土壤蒸发的加剧导致表层含水量的不断减小, 使得分布于土壤剖面的盐分随着水分的迁移向地表积聚, 导致土壤上层盐分逐渐增加, 并于 6 月 10 日左右达到年内最大,  $EC_w$  的最大值约为 27 dS/m,  $EC_{sat}$  的最大值约为 13 dS/m。此期间盐分以向地表迁移为主, 土壤处于积盐状态。作物生长中期(6 月中旬到 7 月中旬), 强劲的蒸发作用下作物需水量加大。6 月 11 日的灌溉, 使得  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  剧减, 其原因为快速下渗的灌溉水分的平均盐分浓度远小于土壤根区层的土壤溶液的盐分浓度。之后随着农田土壤水分的增加, 蒸发作用受到抑制, 水分以下渗为主, 盐分随着水分也向深层运移,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  整体呈现下降趋势, 土壤处于脱盐状态。作物生长中后期(7 月中旬到 8 月末), 日蒸发量达到年内最大, 降水量也逐渐增大, 再加上灌溉浇水, 多重作用影响下,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  呈现多折变化趋势, 多次出现小峰值并迅速降低, 但土壤盐分整体处于动态平衡状态。阶段性的蒸发作用使土壤水分在短期内减小到低值,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  增大, 随后间歇的无计划灌水使得  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  在达到小峰值后便开始降低(注: 此处降雨量非常小, 土壤水分基本靠灌溉补给。且试验区农田距灌溉水渠特别近, 随时可以抽调黄河水进行灌溉, 所以该区域采用粗放式灌溉方式, 仅当农田土壤稍微干涸, 或仅是不够湿润的状态下, 就会利用周边的灌溉沟渠进行大小不等规模的灌溉)。在整个作物生长季节, 土壤 10 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  多数时间分别在 10~15 dS/m 和 5~10 dS/m 范围内波动, 高于盐化和非盐化土壤分类标准 4 dS/m(USSL Staff, 1954), 虽然存在短暂的土壤脱盐阶段以及较长时段的盐分动态平衡状态, 但在土壤上层 10 cm 深度盐分含量还是较高, 说明土壤盐化现象仍然较明显。

在整个作物的生长季节, 土壤 20, 40 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值大小发生着反复变化(图 5)。作物生长初期, 20 cm 深度的盐分含量要高于 40 cm 深度的盐分含量, 且 20 cm 深度处的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  随着时间的推移表现出下降趋势; 40 cm 深度则呈现上升趋势。作物的生长中期, 土壤 40 cm 深度的  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  值在大部分时间要高于 20 cm 深度。8 月上旬在灌溉的作用下, 20 cm 深度  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  高于 40 cm 深度, 而在 8 月中下旬, 20 cm 深度  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  逐渐在下降, 而 40 cm 深度又表现出上升的趋势。

土壤 20 cm 和 40 cm 深度的盐分变化规律较上层 10 cm 复

杂, 是由土壤水盐运移的复杂机理决定的。非土壤表层的 20 cm 和 40 cm 深度的盐分既会随着地表水分的强烈蒸发而向土壤上层、甚至地表运移, 又会随着水分的下渗向土壤深层及地下水中迁移, 受土壤水分含量、蒸发及其它条件的影响, 不同时期盐分上移或下渗数量及运移可到达的深度并无规律。此外, 20 cm 和 40 cm 深度会受到土壤上层盐分下渗或下层盐分上移的共同影响, 大水量灌溉发生时, 地下水位埋深会随之升高, 40 cm 深度的盐分运移还将受到潜水蒸发的影响。蒸发强烈时期, 潜水蒸发作用甚至会影响到土壤地表的积盐程度。因此, 土壤 20 cm 和 40 cm 深度盐分运移较复杂, 盐分浓度在时间序列上呈现出大小交替变化的特点。

## 4 结 论

(1) 受灌溉、降水及蒸发的共同作用, 地下水位在年内呈现“多峰”变化过程, 总体埋深较浅, 观测井 1 年内变幅约为 90 cm, 地下水位埋深最大为 128 cm, 最小为 38 cm。观测井 4 年内变幅约为 116 cm, 地下水位埋深范围为 24~140 cm 之间。随时间变化, 地下水位总体上呈现逐渐抬升的趋势。地下水位这种动态变化与土壤盐分变化密切相关, 却又非同步升降。当降雨或灌溉时, 地下水位升高, 但同时土壤盐分又被淋溶, 此后随着排

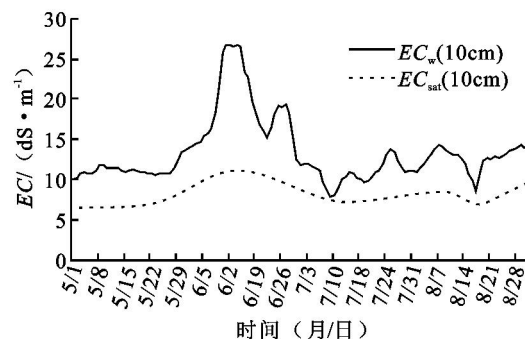


图 4 土壤 10 cm 深度,  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  随时间变化关系 (2008-05-01 至 2008-08-31)

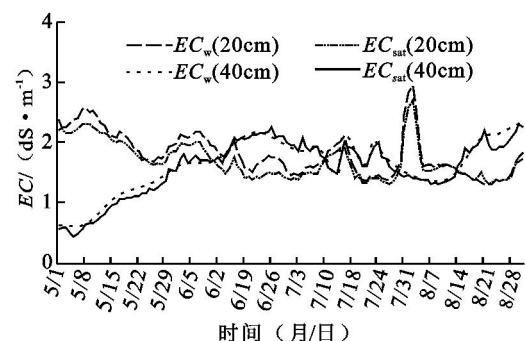


图 5 不同深度  $EC_w$  和  $EC_{sat}$  随时间的变化关系 (2008-05-01 至 2008-08-31)

水和蒸发,地下水位开始回降,土壤因蒸发而开始积盐,土壤积盐的过程发生在地下水位从高到低的回落过程中,直至水位降至临界深度以下。因此,水位回降越慢,土壤积盐越多。

(2) 在整个时间序列上,土壤水分含量在垂向上的分布整体表现为下层高于上层,且在土壤冻结前(2007年12月之前),10 cm深度的土壤含水量呈现逐渐降低趋势,波动范围为36%~42%,20,40,60 cm深度的土壤含水量基本维持在41%~45%范围,波动较小;土壤消融后(2008年3月20日之后),10 cm深度的土壤含水量依旧呈现递减趋势,且水分含量相对较低,维持在20%~30%之间变动,其他深度土壤含水量变化较复杂,总体规律为减小增加再次减小,波动范围为33%~50%。

(3) 2007作物生长后期到土壤冻结之前(即9月19日到12月13日期间),土壤表现为脱盐及盐分动态平衡状态。多数时间,10 cm深度的 $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 在4~5 dS/m之间做微小变动,20 cm深度的 $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 值略高于2 dS/m,而40 cm深度值维持在2 dS/m左右。从垂向上来看,土壤剖面上层的 $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 值要高于下层。在作物生长初期(2008年)土壤处于积盐状态。作物生长中期,在灌溉作用下,土壤处于脱盐状态, $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 整体呈现下降趋势。作物生长中后期,在灌溉、降水等多重作用影响下, $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 呈现多折变化趋势,多次出现峰值,但土壤盐分整体处于动态平衡状态。在整个作物生长季节,土壤10 cm深度的 $EC_w$ 和 $EC_{sat}$ 多数时间分别在10~15 dS/m和5~10 dS/m范围内波动,高于盐化和非盐化土壤分类标准4 dS/m,表明土壤盐化现象仍然较明显。土壤20 cm和40 cm深度的盐分变化规律较上层10 cm复杂,盐分浓度在时间序列上呈现大小交替变化的特点。

#### 参考文献:

- [1] 李任敏,常建国,吕皎,等. 太行山主要植被类型根系分布及对土壤结构的影响[J]. 山西林业科技, 1998(1): 17-19.
- [2] 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分析[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 83-86.
- [3] 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.
- [4] 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. J., 1980, 44: 1216-1221.
- [5] Nadler A. Field application of the four electrode technique for determining soil solution conductivity[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 30-34.
- [6] Dalton F N, Herkelrath W N, Rawlins D S, et al. Time domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical with a single probe[J]. Science, 1984, 224: 1931-1939.
- [7] Dirksen C. Soil physical measurements[M]. Reiskirchem, Germany: Catena Verlag, 1999: 1-154.
- [8] Tanji K. Agricultural salinity assessment and management (Asce Manual and Reports on Engineering Practice)[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1990: 1-619.
- [9] 王维真,小林哲夫. 利用 TDR 对土壤含水量及土壤溶液电导率的同步连续测量[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 488-493.
- [10] 侯春霞,胡海英,魏朝富,等. 土壤溶质运移研究动态及展望[J]. 土壤科学, 2003, 34(1): 70-73.
- [11] 马文敏,康金虎. TDR 在土壤盐分测试中的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(6): 10-12.
- [12] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time domain reflectometry(TDR): a field evaluation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 19-24.
- [13] 孙玉龙,郝振纯. TDR 技术及其在土壤水分及土壤溶质测定方面的应用[J]. 灌溉排水, 2000, 19(1): 37-41.
- [14] Rhoades J D, Manteghi N A, Shouse P J, et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(5): 433-439.
- [15] Kobayashi T, Wang W, Ikawa Y, et al. An easily measurable and practical index of soil salinity[J]. J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour., 2006, 19(6): 183-188.
- [16] 毛任钊,刘小京,姜华君. 华北平原缺水盐渍区浅层地下水位动态分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 564-572.
- [17] 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.