

# 耕作期内土壤水分和盐分运动规律

## ——试验设计及水盐变化

张楠<sup>1</sup>, 韩金旭<sup>1</sup>, 江红<sup>2</sup>, 蒋晓辉<sup>1</sup>, 苏晓慧<sup>1</sup>, 李皓冰<sup>1</sup>

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 黄河流域水资源保护局, 河南 郑州 450004)

**摘要:** [目的] 分析灌溉期内土壤水盐变化规律, 为改进灌区耕作期灌溉制度存在的现行问题, 土壤盐碱化治理以及研究节水型灌溉工程的实施对生态环境的影响提供科学指导。[方法] 考虑土壤质地、灌溉方式、作物种植等因素进行试验点、观测点的布设, 通过常规方法对水分变化、含水率、土壤盐分、地下水盐分等方面进行了计算分析, 在此基础上, 对其影响因子(灌溉方式、灌溉制度等)进行相关性分析。基于 2 a 耕作期内时空变化监测数据分析土壤水分、盐分运动变化特点。[结果] 耕作期土壤含水率随土层深度增加而增加, 含水率变化频率随土层深度增加而减少。[结论] 耕作期内, 在地下水埋深较浅的情况下, 过大的降雨量(灌水量)并不能得到更高的脱盐效率, 甚至可能降低脱盐率, 表层土壤呈现较明显的脱盐过程; 地下水盐分变化与降雨关系密切。

**关键词:** 耕作期; 地下水埋深; 土壤含水率; 土壤盐分; 地下水盐分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0082-06

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.081

## Movement of Soil Moisture and Salt During Farming Period

### — Experiment Design and Water-Salt Movement Change

ZHANG Nan<sup>1</sup>, HAN Jinxu<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>2</sup>, JIANG Xiaohui<sup>1</sup>, SU Xiaohui<sup>1</sup>, LI Haobing<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, Zhengzhou, He'nan, 450004, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this paper is to analyze the dynamic changes of soil water and salt during the farming period in order to provide the scientific guidance for soil salinization control and the implementation of water-saving irrigation project. [Methods] We designed the experiments according to the soil texture, irrigation methods, crop cultivation and other factors. We calculated and analyzed the variations in water content, moisture content, soil salinity and groundwater salt through the conventional methods. Based on 2 years observation data, we analyzed the dynamic changes of soil moisture, and salt movement. [Results] Soil moisture content increased with the increase of soil depth, and the change frequency in soil moisture content decreased with the increase of soil depth during farming period. [Conclusion] During the farming period, heavy rainfall(drop water) may reduce desalting efficiency, and the surface soil shows an obvious desalting when the groundwater are shallow. Changes in groundwater salinity are closely related to rainfall.

**Keywords:** farming period; groundwater level; moisture content of soil; soil salinity; groundwater salinity

土壤水分、盐分是土壤盐渍化研究中的 2 个重要参数<sup>[1]</sup>等。影响土壤水分、盐分的因素很多, 与土壤水力特性有关的因素(质地、容重、有机质含量等)都可能成为影响的变异源<sup>[2-3]</sup>。这些因素又受到农田耕作、管理方式、植被类型、生物活动、雨滴击溅、干湿和冻融交替等自然过程和人类活动的强烈影响<sup>[4-5]</sup>。

国内外关于土壤水分、盐分的研究是从 20 世纪 60 年代开始, 研究的重点集中在季节性冻融土区<sup>[6]</sup>。李元寿等<sup>[7]</sup>采用地统计学方法研究青藏高原高寒草甸覆盖区域浅层剖面土壤水分的空间异质性特征, 研究结果发现随着高寒草甸区土层的 30 cm 以下的土壤水分受自相关因素和随机因素共同控制; 李瑞平

收稿日期: 2014-06-24

修回日期: 2014-07-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“傍河开采对河川径流袭夺量影响研究”(51309107), “基于水库群多目标调度的黑河流域复杂水资源系统配置研究”(91325201); “十二五”科技支撑计划“黄河中游河川径流锐减驱动力及人为调控效应研究”(2012BAB02B04)

第一作者: 张楠(1981—), 男(汉族), 安徽省阜阳市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源、土壤水等研究。E-mail: zhangnan19810202@126.com。

等<sup>[8]</sup>采样分析认为土壤水分、盐分在土壤冻融期、冻结期和融解期 3 个时期不同深度活跃程度存在差异;李元寿<sup>[9]</sup>等人研究发现冻结过程和融化过程中,不同覆盖度的所有深度土壤水分融化历时远远小于冻结历时;吴谋松等<sup>[10]</sup>通过 Hangen—Poiseuille 孔隙通量方程,提出了冻土水流通量模型,研究发现冻融过程中水流通量受到中间层冻土和地下水顶托的影响,从微观的角度很好地解释了土壤冻结过程中冰水共存状态下土壤中水流通量变化规律。

以上这些研究成果对于土壤水分、盐分变化提供了良好的研究方法和基础。土壤水分、盐分作为干旱半干旱缺水地区重要的水资源,在灌溉耕作期内耕作层盐分富集、脱盐等具有特别意义<sup>[11]</sup>,而灌溉耕作期土壤水分、盐分的研究相对较少。灌区耕作期土壤水分、盐分变化直接影响灌区的耕作、管理方式,对于干旱半干旱缺水地区发展高效实用的节水型现代农业的建设起着关键作用。

本文利用鄂尔多斯南岸灌区田间耕作期 2 a (2012,2013 年)监测资料,在说明试验点布设情况的基础上,对 17 个观测点水分、盐分变化进行探讨,为第 2 篇地下水埋深、土壤盐剖面分区等条件下灌区土壤水盐运移规律,揭示耕作层盐分富集机理研究提供铺垫,以期改进灌区耕作期灌溉制度存在的现行问题、土壤盐碱化治理以及节水型灌溉工程的实施对生态环境的影响等方面提供理论依据。

## 1 试验设计

研究野外观测试验按照试验区耕作期每年从 4 月 24 日开始,至 9 月 18 日结束,历时 149 d,共监测 2012,2013 年 2 a。采集土样 5 693 个,观测地下水埋深 1 010 次,土壤盐分 1 010 次,现场测试地下水水质 1 110 次、灌溉水质 20 次、灌溉水量记录 20 次。同时

利用观测期内临近 4 旗县(达拉特旗、土默特右旗、准格尔旗与托克托县)气象数据。

### 1.1 试验点的布设

在综合考虑南岸灌区水利工程建设情况、灌溉方式、地下水位、土壤盐碱化程度等因素的基础上,选取吉格斯太灌域为试验区。现场布点时,首先根据喷灌工程的实施情况确定喷灌区观测点位置,采用便携式盐分计(2265FS)测定表层土壤含盐量,然后在相邻渠灌区选取与喷灌区观测点的表层土壤含盐量相近的区域进行布点。同时,本试验还将对土壤纵向的水分盐分变化进行监测,按照纵向 5 个深度布置取样点,分别为 10,30,50,70 和 100 cm。

### 1.2 观测点布设及编号

试验采用 17 个观测点,分别布设在 1<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>,11<sup>#</sup> 喷灌区及相邻渠灌区内,每个点布设 1 眼地下水观测井,观测井附近田块即为对应的试验观测区,在观测区内取土测含水量及含盐量。

观测点分布及编号详细情况如下:9<sup>#</sup> 喷灌区:布设 6 个观测点;1<sup>#</sup> 喷灌区:布设 7 个观测点;11<sup>#</sup> 喷灌区:布设 4 个观测点。在具体布点时,考虑到喷灌设施工程进展情况,现场布点时暂定了 17 个观测点。A—F 区为渠灌区,灌溉水源为黄河水;G—N 及 Q 区为井灌区,灌溉水源为当地地下水;O—P 区为荒地,未播种,且无灌溉。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水分变化特点

2.1.1 地下水埋深 结合试验数据,在充分考虑初始地下水埋深、灌溉方式及区域分布等因素的基础上,选择了 A,D,I,N 这 4 个观测区作为代表,进行地下水埋深变化分析。绘制各区域 4 月下旬至 9 月中旬地下水旬值变化情况如表 1 和图 1 所示。

表 1 鄂尔多斯南岸灌区观测区潜水埋深变化

观测区	地下水埋深/m				所处区域	灌溉方式	灌溉次数	作物种类
	初值	最小	最大	极差				
A	1.25	0.45	1.82	1.37	9 <sup>#</sup>	引黄	2	西瓜
D	1.48	0.79	1.8	1.01	9 <sup>#</sup>	引黄	2	玉米
I	2.44	1.80	3.71	1.91	1 <sup>#</sup>	井灌	3	玉米
N	1.73	0.96	2.23	1.27	11 <sup>#</sup>	井灌	2	玉米

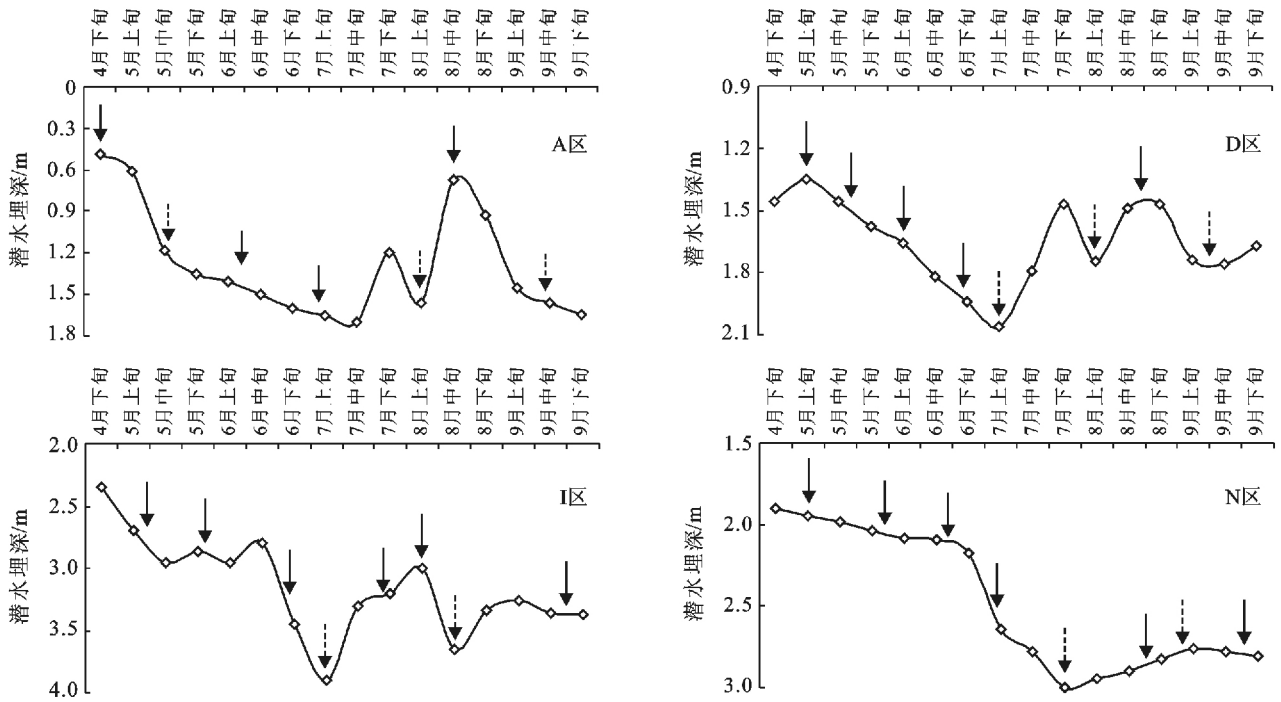
由表 1 可知,引黄灌区地下水埋深初值均小于井灌区,各区域中 A 区最小(1.25 m),I 区最大(2.44 m)。就变化幅度而言,I 区水位变幅最大,达 1.91 m,其次为 A 区 1.37 m。试验区地下水埋深变化的总体趋势为由北向南逐渐加深,与黄河对地下水补给作用逐渐减

弱有关,而相同区域年际间的初始水位差异与气象条件差别有关。

可以看出,尽管灌溉制度不同,但不同观测区内地下水位变化规律基本相同。各区域地下水埋深均表现出前期下降,后期上升的变化趋势。根据观测

区气象数据可知,观测期 2012,2013 年项目区降雨频繁,特别是 6 月下旬与 7—8 月两时间段,出现长时间连续降雨地下水为在相应时段内出现峰值。此外,较

大的降雨,冲淡了由于灌溉制度不同所造成的潜水埋深差异,形成不同观测区地下水埋深的变化趋于一致。



注:实线箭头为灌溉;虚线箭头为较大降雨。下同。

图 1 鄂尔多斯南岸灌区地下水埋深变化

2.1.2 土壤含水率 选择 A,I,N,P 共 4 个观测区作为代表,分析土壤含水率变化,绘制 4 区域不同土层耕作期含水率变化(图 2)。可以看出,不同观测区土壤含水率变化较为剧烈,7—8 月的各区土壤含水率均较高。

地下水埋深较浅的 A,N,P 区各层土壤含水率均较高,N 区与 P 区耕作后期土壤含水率升高明显,而地下水深埋的 I 区土壤含水率则相对处于较低水平。这与浅埋区土壤含水率受地下水与降雨和灌溉等影响因素有关。

由图 2 可以看出,随着土层深度的增加,含水率变化幅度减缓,土壤深度是影响潜水蒸发主要因素之一,蒸发蒸腾作用直接影响土壤含水量(李玮,等<sup>[12]</sup>)。各层土壤含水率随土层深度增加而加大,A,N 区与 P 区底层含水量均较大,I 区最小,这与 4 者中 I 区潜水埋深最大的事实相符。

2.2 盐分变化特点

2.2.1 土壤盐分 17 个观测区全耕作期土壤脱盐率如表 2 所示。计算 17 个观测区土壤表聚系数,并绘制 A, I, N, 与 P 区表聚系数变化过程(图 3)。

表 2 鄂尔多斯南岸灌区各区域不同土层年度脱盐率均值

%

年份	土层/cm	渠灌区(A—F)	井灌区(G—N & Q)	荒地(O—P)	均值(A—Q)
2012	20	-29.11	-28.61	-15.49	-24.40
	40	-16.25	-20.27	-18.94	-18.49
	60	-13.55	-19.07	-21.94	-18.19
	80	-12.83	-18.62	-25.67	-19.04
	100	-14.40	-18.56	-25.28	-19.41
2013	20	-57.74	-69.69	17.09	-36.78
	40	-42.66	-62.35	28.50	-25.50
	60	-25.97	-57.40	1.02	-27.45
	80	-14.46	-54.00	13.78	-18.23
	100	-10.11	-46.00	4.61	-17.17

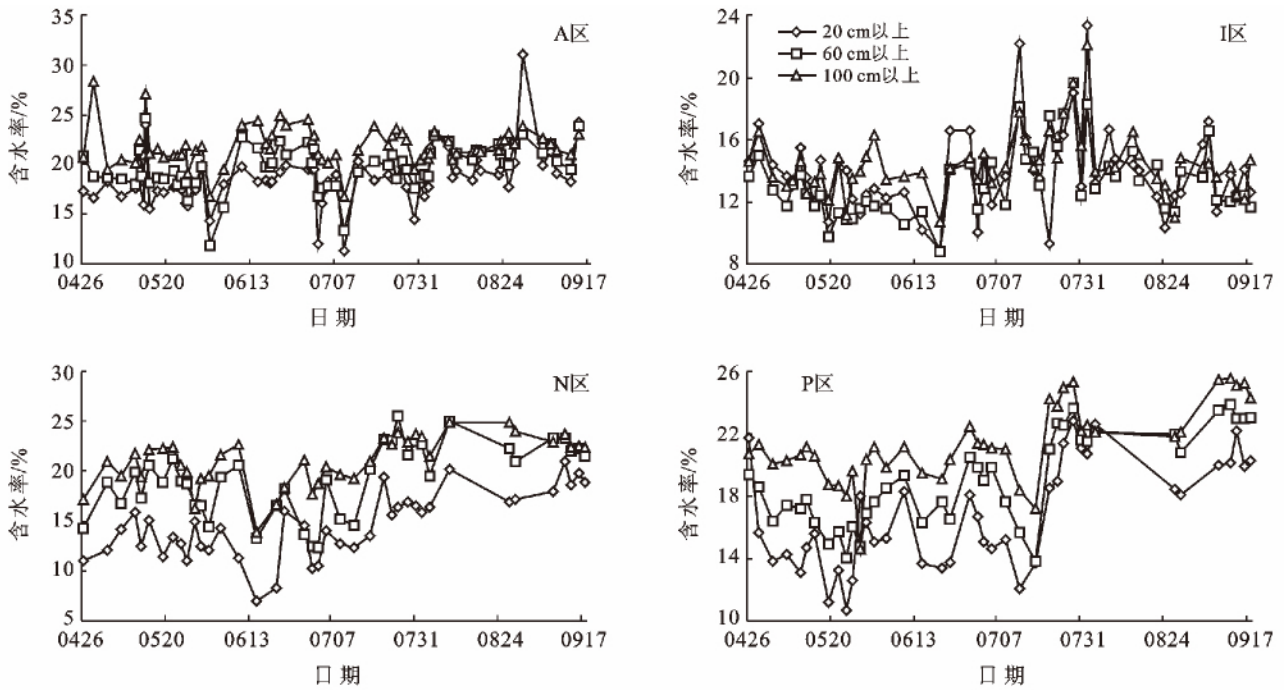


图 2 鄂尔多斯南岸灌区不同土层埋深含水率变化

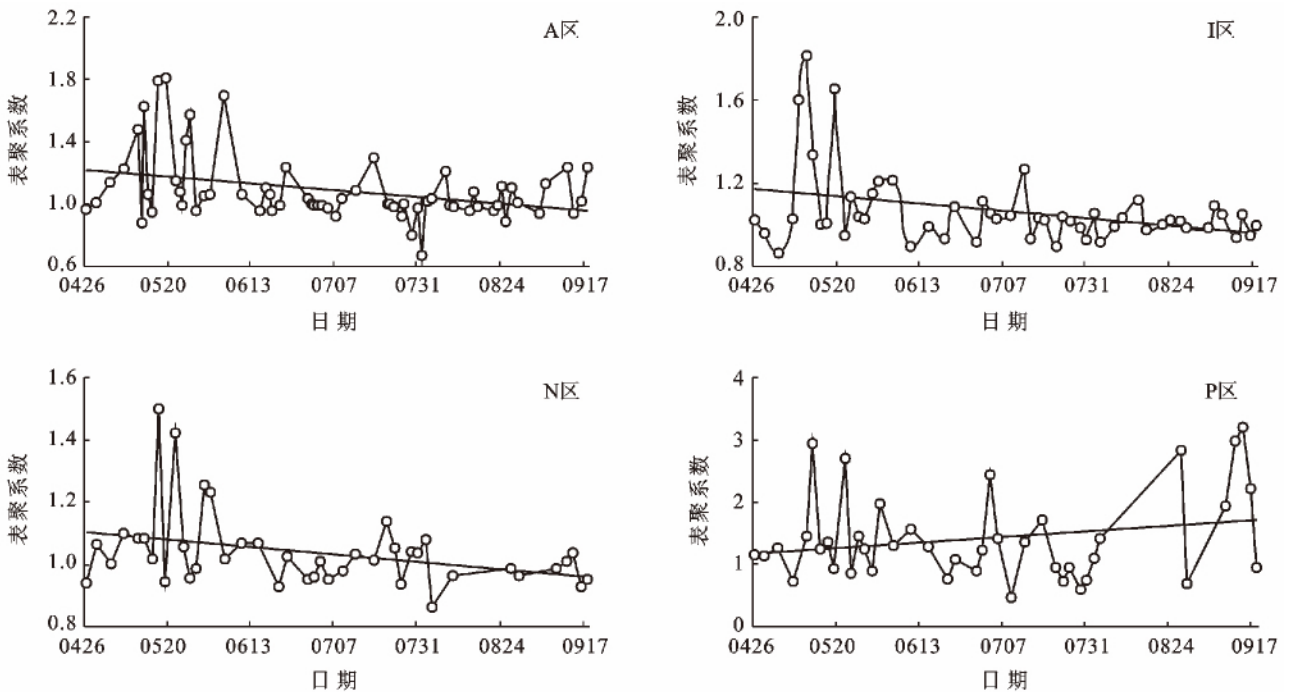


图 3 鄂尔多斯南岸灌区不同观测区土壤盐分表聚系数变化

可以看出,除荒地外,各观测区表聚系数均呈下降趋势,荒地的表聚系数升高较明显,平均升高值为 38.4%。

这一现象表明,在地下水埋深较浅的情况下,过大的降雨量(灌水量)并不能收到更高的脱盐效率,甚至可能降低脱盐率,表层土壤呈现较明显的脱盐过程(表 2),土壤盐分的表聚能力降低;不灌(O区与P

区)区域,地下水位较浅,表层盐分累积。

2.2.2 地下水盐分 农田土壤表层承接地表来水,洗盐压碱,底层受地下水顶托,吸水纳盐,地下水盐分变化与区域土壤次生盐碱化之间关系密切。为明确地下水盐分变化,分别在渠灌及井灌区选择具有代表性的 A,D,E,F 和 G,H,I,N 共 8 个观测区,分析地下水盐分旬值变化,各区域地下水盐变化及耕作情况见表 3。

表 3 鄂尔多斯南岸灌区不同区域潜水盐分变化及耕作制度

观测区	地下水电导率/( $s \cdot cm^{-1}$ )				均值	所处区域	灌溉方式	灌溉次数	是否耕种
	初值	最小	最大	极差					
A	2 650	1 095	2 820	1 725	2 009	9 <sup>#</sup>	引黄	2	是
D	2 310	2 310	2 840	530	2 627	9 <sup>#</sup>	引黄	2	是
E	1 008	906	1 048	142	999	9 <sup>#</sup>	引黄	2	是
F	1 097	755	1 133	378	1 015	9 <sup>#</sup>	引黄	2	是
G	1 420	1 179	1 804	625	1 466	1 <sup>#</sup>	井灌	4	是
H	1 293	1 122	1 465	343	1 266	1 <sup>#</sup>	井灌	4	是
I	895	472	1 284	812	1 085	1 <sup>#</sup>	井灌	4	是
N	762	569	1 335	766	734	11 <sup>#</sup>	井灌	2	是

由于监测段内观测区降雨较多,灌溉次数有所减少,年度地下水位与含盐量变化主要受降雨影响。进入雨季之后,观测区出现多次连续降雨,很难对次降

雨进行划分,因此根据各旬降雨情况,对大于 10 mm 的旬降雨期内选择渠灌区与井灌区典型观测区绘制地下水盐分变化过程如图 4 所示。

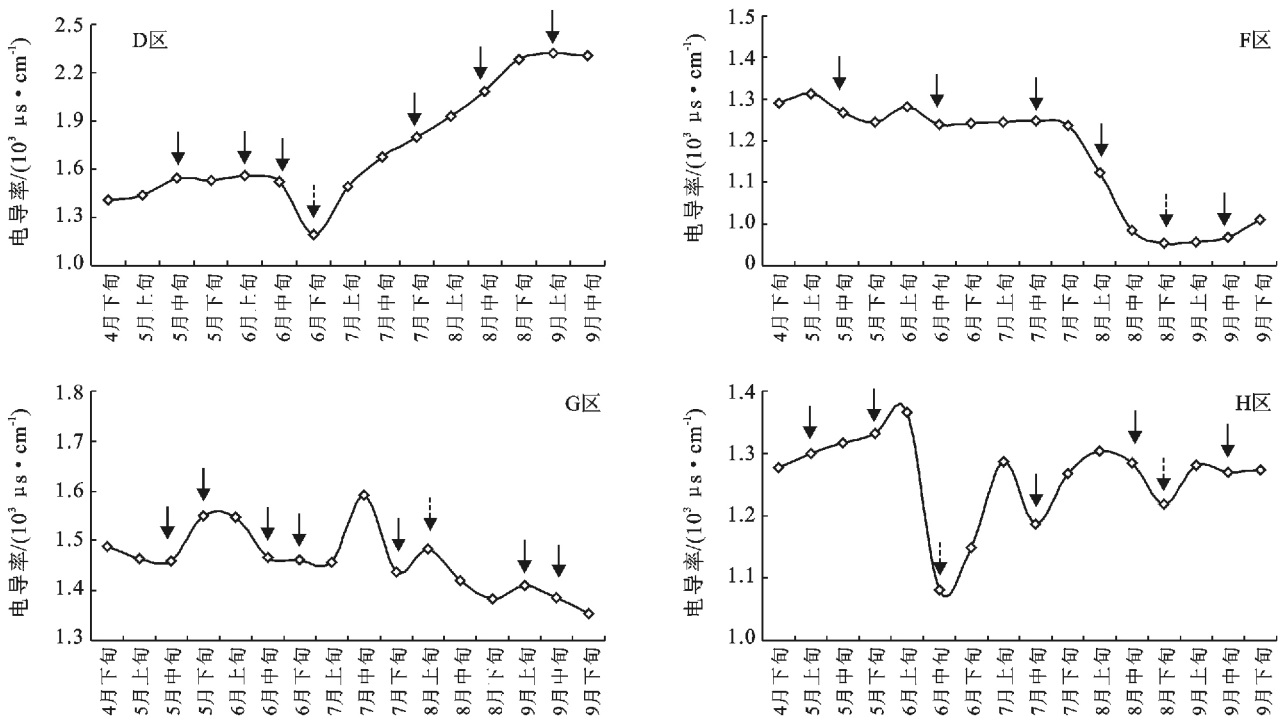


图 4 鄂尔多斯南岸灌区观测区地下水盐分变化

由图 4 可见,从观测区总体情况来看,在耕作初期,地下水电导率变化比较剧烈,进入 7 月中下旬后,大部分测区地下水电导率值维持在较低水平,直至 9 月之后才开始升高,而这一变化与观测区此时期维持了近 10 d 的晴朗天气有关。在各次较大降雨过程中,地下水电导率均出现了较为集中的跌落。地下水盐分变化与降雨之间具有明显的响应关系。

### 3 结论

(1) 耕作期含水率随土层深度增加而增加,含水率变化频率随土层深度增加而减少。

(2) 在地下水埋深较浅的情况下,过大的降雨量(灌水量)并不能收到更高的脱盐效率,甚至可能降低脱盐率,表层土壤呈现较明显的脱盐过程,不灌区域,地下水位较浅,表层盐分累积,测区土壤表层盐分富集无明显增强或减弱趋势。

耕作条件下地下水埋深对土壤水盐运移规律的研究仍是今后土壤科学的研究重点。下一步的工作中应选取不同质地的土壤,不同程度盐渍化土壤条件下水分入渗随灌溉时间的不同发生的动态变化,进一步开展不同灌溉水质、土壤类型及盐分的分布和迁移能力设计,收集灌溉工程调控方案下的试验数

据。为干旱半干旱缺水地区发展高效实用的节水型现代农业的建设提供支撑。

[ 参 考 文 献 ]

- [1] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 70(5):1569-1578.
- [2] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4):295-302.
- [3] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. 水科学进展, 2013, 24(3):340-348.
- [4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):3-22.
- [5] Roger-estrate J, Richard G, Dexter A R, et al. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1):135-142.
- [6] 马睿, 伍靖伟, 查元源, 等. 内蒙古河套灌区冻融土壤水分迁移简化模型[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6):1-5.
- [7] 李元寿, 王根绪, 丁永建, 等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展, 2008, 19(1):61-67.
- [8] 李瑞平, 史海滨, 付小军, 等. 干旱寒冷地区冻融期土壤水分和盐分的时空变异分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1):86-89.
- [9] 李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动场土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1):157-165.
- [10] 吴谋松, 王康, 谭霄, 等. 土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):543-550.
- [11] Rengasamy P. Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soil: An overview[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2002, 42(3):351-361.
- [12] 李玮, 王立, 姜涛. 地下水浅埋区盐碱地滴灌条件下土壤盐分运移研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5):130-134.
- [14] Karickhoff S W, Morris K R. Impact of tubificid oligochaetes on pollutant transport in bottom sediments [J]. Environmental Science & Technology, 1985, 19(1):51-56.
- [15] 宋进喜, 任朝亮, 李梦洁, 等. 河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8):2062-2069.
- [16] Lagauzère S, Boyer P, Stora G, et al. Effects of uranium-contaminated sediments on the bioturbation activity of *Chironomus riparius* larvae (Insecta, Diptera) and *Tubifex tubifex* worms (Annelida, Tubificidae) [J]. Chemosphere, 2009, 76(3):324-334.
- [17] Mermillod-Blondin F, Francois-Carcaillet F, Rosenberg R. Biodiversity of benthic invertebrates and organic matter processing in shallow marine sediments: An experimental study [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 315(2):187-209.
- [18] 孙刚, 房岩, 汪爱武, 等. 颤蚓对水田沉积物颗粒垂直迁移的生物扰动效应[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25):20275-20276.
- [19] Davis R B. Stratigraphic effects of tubificids in profundal lake sediments [J]. Limnology and oceanography, 1974, 19(3):466-488.
- [20] 庞俊晓, 游静. 生物扰动对沉积物中污染物环境行为与生物可利用性的影响[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(6):805-816.
- [21] 袁兴中, 何文珊. 海洋沉积物中的动物多样性及其生态系统功能[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5):458-463.
- [22] Eckman J E, Nowell A R M, Jumars P A. Sediment destabilization by animal tubes [J]. Journal of Marine Research, 1981, 39(2):361-374.
- [23] Meysman F J R, Middelburg J J, Heip C H R. Bioturbation: A flesh look at Darwin's last idea [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 21(12):688-695.
- [24] Je C, Hayes D F, Kim K. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model [J]. Chemosphere, 2007, 70(2):187-195.
- [25] 蒋东辉, 高抒. 海洋环境沉积物输运研究进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1):100-108.

(上接第 81 页)