

# 单双管微咸水膜下滴灌棉田根区土壤水电导率空间变异分析

胡文同<sup>1</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 高印轩<sup>1</sup>, 曾尚<sup>1</sup>, 陈俊英<sup>1,2</sup>, 栗现文<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 土壤水电导率可直接表征土壤水易溶盐状况,为分析单、双管微咸水膜下滴灌棉田根区土壤盐分空间分布差异,采用WET探针针对0~60 cm深度的剖面土壤水电导率进行网格化监测。通过统计特征值分析、半方差函数构建和Kriging空间插值等,获取土壤水电导率空间变异与分布特征。结果表明:单、双管滴灌模式下土壤水电导率均呈中等强度变异,且最优半方差函数拟合模型为高斯模型。同时,单管模式下结构性因素引起的变异强于双管模式。在试验壤土条件下,双管模式积盐程度相对较高,差异性达到了显著性水平( $P < 0.05$ );单管模式则因相对较大的滴头流量,具有更强的横向渗流扩展洗盐能力。研究结果可为优化微咸水灌溉方式提供一定指导。

**关键词:** 微咸水; 膜下滴灌; 土壤水电导率; 空间变异; 土壤剖面; 棉田

中图分类号: S275; S562

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0250-06

## Spatial variability of soil water conductivity in root-zone of cotton filed under single and double-tube modes under mulched drip irrigation with brackish water

HU Wentong<sup>1</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, GAO Yinxuan<sup>1</sup>, ZENG Shang<sup>1</sup>, CHEN Junying<sup>1,2</sup>, LI Xianwen<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil water conductivity can directly characterize soluble salt status. To analyze the spatial distribution of soil salinity in cotton root zone under single-tube and double-tube modes under mulched drip irrigation with brackish water, WET probes were used to measure the soil water conductivity of selected soil profile from 0 to 60 cm in this study. The spatial distribution and variability of soil conductivity were evaluated by statistical eigenvalue analysis, semi-variance function construction and Kriging interpolation. The results showed that soil water conductivity varied moderately and the optimal semi-variance function fitting models were Gauss models under two drip irrigation modes. The spatial variation of the single-tube mode was more affected by structural factors than the double-tube mode. The salt accumulation was higher in the double-tube mode for the loam soil, which reached the significance level ( $P < 0.05$ ), and the single-tube mode was more capable of transversing seepage expansion. The results can provide some guidance for optimizing brackish water irrigation.

**Key words:** brackish water; mulched drip irrigation; soil water conductivity; spatial variability; soil profile; cotton field

收稿日期:2018-11-20; 修回日期:2019-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41502225);西北农林科技大学博士科研启动费项目(2452017044)

作者简介:胡文同(1997-),男,山东菏泽人,本科生,西北农林科技大学水利与建筑工程学院。

通讯作者:栗现文(1985-),男,河北邯郸人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事灌区土壤水-盐运移监测与模拟等研究工作。

## 1 研究背景

水资源短缺和土壤盐渍化是干旱区农业可持续发展面临的两个主要问题<sup>[1]</sup>。而在我国西北、华北地区广泛分布着微咸水,利用微咸水对农作物进行灌溉具有很大的开发潜力<sup>[2-3]</sup>。膜下滴灌技术具有减少棵间蒸发、保温保墒、浸润到位等优点<sup>[4-5]</sup>,而且能减少深层渗漏量、缓解盐分在作物根区聚集<sup>[6]</sup>,被认为是目前最合理有效的微咸水开发利用技术之一<sup>[7-8]</sup>,因此在我国新疆等干旱区得到了广泛应用<sup>[9-10]</sup>。但因滴灌浸润深度所限,微咸水膜下滴灌会使湿润体及其附近土壤积盐<sup>[11]</sup>,并使得土壤盐分的空间变异性增强。

微咸水滴灌条件下的土壤盐分分布特征对棉花生长具有重要控制作用,国内外对膜下滴灌棉花根区土壤盐分的迁移规律开展了大量研究。膜下滴灌条件下土壤各层次盐分含量变化趋势大体相同,从苗期开始呈现降低-升高-再降低的过程<sup>[12]</sup>。高矿化度水长期灌溉导致耕层土壤明显积盐,低矿化度水灌溉则降低了土壤盐分<sup>[13]</sup>。也有研究表明,膜下滴灌使得下层土壤(60~100 cm土层)有积盐趋势<sup>[14]</sup>。单、双管滴灌模式对比显示,一膜双管膜下滴灌模式下棉花根区形成淡化脱盐区,而一膜单管模式则在滴头处具有更强的淋洗能力<sup>[15]</sup>。在剖面尺度,土壤含盐量变异性有随着深度增加呈先减弱再增强的趋势<sup>[16]</sup>。但现有研究中,较少系统分析单、双管两种微咸水膜下灌溉模式下土壤盐分空间变异的差异性。

土壤水电导率可表征土壤水易溶盐含量,研究表明二者具有显著正相关关系<sup>[17-18]</sup>。而土壤水易溶盐含量则直接关系到作物根系吸水能力和营养元素吸收<sup>[19-20]</sup>。采用 WET(Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK)探针通过测定土壤的介电性质来测定土壤水电导率,具有速度快(5 s)、易插入、适合多种土

壤类型及稳定精确的优点<sup>[21]</sup>,可节省人工取样测定所需的大量人力、物力。本研究选取棉花耗水量较大的花龄期,开挖0~60 cm深度二维剖面,精细测定单、双管两种膜下滴灌模式下的土壤水电导率分布状况,通过进行统计特征值分析和构建地统计学半方差函数模型,进而分析两种模式下的土壤水电导率的空间变异与分布特征的差异性。其结果可为优化田间节水控盐模式提供一定的理论支持,为微咸水膜下滴灌技术的进一步推广应用提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验站点概况

田间小区位于新疆塔里木河流域巴音郭勒管理局水利科研所国家重点灌溉试验站(东经86°10',北纬41°35')。该试验站地处天山南麓塔里木盆地边缘孔雀河冲积平原带,地势平缓,海拔900 m左右;属典型的暖温带大陆性荒漠气候,干旱少雨,蒸发强烈,多年平均降水量58.6 mm,蒸发量2788.2 mm,年平均气温为11.48℃。试验地以壤土为主,土质较均一,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为46.81%、45.96%和7.23%,容重为1.69 g/cm<sup>3</sup>。生育期棉花膜下滴灌用水为浅层地下水,灌水矿化度为2.2 g/L左右。

### 2.2 试验方法

微咸水膜下滴灌棉田试验采用“一膜双管”和“一膜单管”两种膜下滴灌模式(图1),灌溉制度一致。选择棉花花龄期1次灌水作为研究对象,于灌水后2~3 d在棉花长势较为均匀处开挖监测剖面。具体为:从膜间向宽行中央垂直开挖至60 cm深度,测坑宽20 cm,在其两侧剖面标出10×10 cm的网格线(图2)。采用 WET 探针在两相对剖面的网格线交点处各测49个点,两种膜下滴灌模式共计98个点,每行取相对点1(3、5、7、9、11、13)和2(4、6、8、10、12、14)的电导率均值作为剖面土壤水电导率。

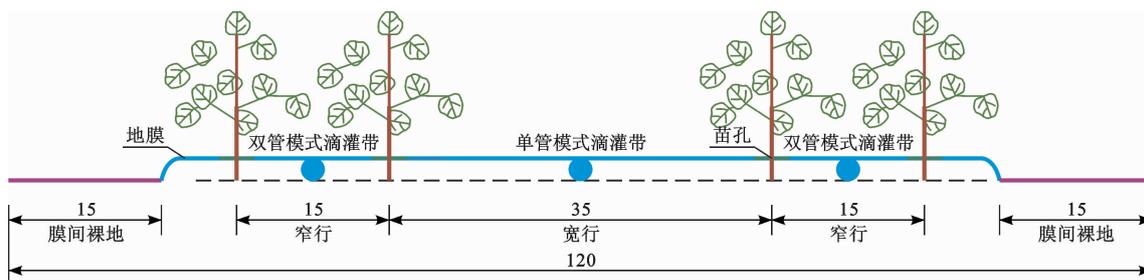


图1 膜下滴灌双管模式和单管模式示意图(单位:cm)

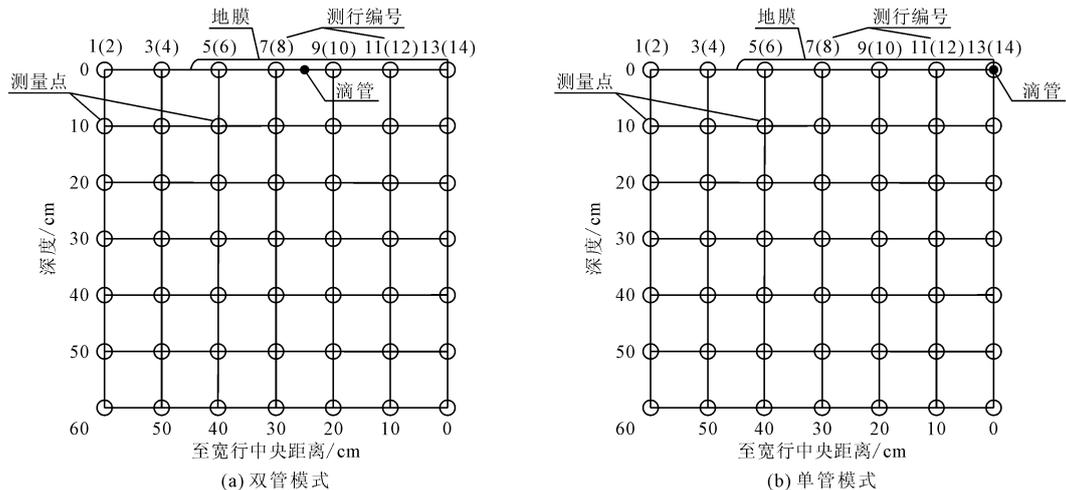


图2 膜下滴灌双管模式和单管模式剖面监测点布设图

### 2.3 合理取样数计算

合理采样数目是指用一个较小样本量去替代总体样本,使抽样样本的均值与方差能够较好地估计总体的均值与方差。计算合理采样数目的方法有正态分布法和  $t$  分布法,目前使用较多的是正态分布法,在已知变异系数的情况下,可采用下式计算<sup>[22]</sup>:

$$n = 3.84 \left( \frac{C_v}{k} \right)^2 \quad (\text{显著性水平 } 95\%) \quad (1)$$

$$n = 2.71 \left( \frac{C_v}{k} \right)^2 \quad (\text{显著性水平 } 90\%) \quad (2)$$

式中: $n$ 为合理采样数; $C_v$ 为变异系数; $k$ 为相对误差。

### 2.4 数据分析

利用 Excel 软件对用 WET 探针测得的 0 ~ 60 cm 深度二维剖面土壤水电导率数据进行汇总和计算;采用 SPSS Statistics 20 软件对数据进行统计分析;通过 GS + 软件进行半方差函数拟合分析及 Kriging 空间插值。

电导率分级计算:在 GS + 软件中,将 Kriging 插值形成的等值线文件输出为 Surfer Grid (.grd) 网格文件格式,并在 Surfer 10 软件中通过网格-体积工具导入,将上表面设为网格文件,下表面设为给定的不同电导率界限值,统计大于不同界限值的平面面积,计算出不同电导率范围对应面积占总面积的比例。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤水电导率统计特征值分析

表1为单、双管膜下滴灌后土壤水电导率统计特征值。由表1的可知:双管模式下,土壤水电导率的极差为 0.73 mS/cm,中值为 0.48 mS/cm,分别为单管模式的 1.92 和 1.26 倍。从均值看,双管模式的土壤水电导率为 0.49 mS/cm,较单管模式增加

44.1%,两者差异性达到了显著性水平( $P < 0.05$ )。以上特征值表明,双管模式下的土壤盐分累积程度相对较高。研究表明,土壤变异系数低于 10% 为低度变异,10% ~ 100% 为中等强度变异,大于 100% 为强度变异<sup>[23]</sup>,单、双管膜下滴灌模式的变异系数分别为 32.17% 和 30.25%,故两种模式的土壤水电导率均为中等强度变异,且较为接近。

### 3.2 合理取样数分析

根据单、双管模式下的土壤水电导率变异系数(表1),通过公式(1)计算两种模式下不同相对误差(5%,10%,15%)条件下的合理采样数,计算结果见表2。

由表2可看出,两种模式均能满足 95% 显著性水平下 10% 的误差精度要求,故这些数据能反映土壤水电导率空间分布状况。

### 3.3 土壤水电导率半方差函数拟合模型

将用 WET 探针测得的两种模式棉田土壤水电导率数据作为区域化变量,用于地统计学空间变异分析,两种滴灌模式下土壤水电导率  $P - P$  正态概率见图3。由图3可知,两种模式被检验数据期望的累计概率均近似为直线,且 K-S 检验的  $P$  值均大于 0.05,故两种模式的电导率数据均服从正态分布,可用地统计学方法来定量研究剖面土壤水电导率的空间变异<sup>[24]</sup>。

半方差函数是表示区域化变量空间相关性的重要函数,主要用来确定结构性因素和随机性因素对土壤空间变异的影响,常用的理论半方差函数模型有球状模型(Spherical Model)、高斯模型(Gaussian Model)及指数模型(Exponential Model)<sup>[25]</sup>。利用 GS + 对获取的不同处理土壤水电导率数据进行半方差函数拟合,结果如表3所示。

表 1 单、双管膜下滴灌后土壤水电导率统计特征值

滴灌模式	样本数 $n$	最小值/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	极差/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	均值/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	中值/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	变异系数/%	偏度	峰度
一膜双管	49	0.22	0.95	0.73	0.49	0.48	0.15	30.35	0.44	0.48
一膜单管	49	0.18	0.56	0.38	0.34	0.38	0.11	32.17	-0.18	-1.13

表 2 基于样本数据的合理采样数计算结果

滴灌模式	实际采样数	变异系数/ %	90% 显著水平下相对误差/%			95% 显著水平下相对误差/%		
			5	10	15	5	10	15
一膜双管	49	30.35	100	25	12	142	36	16
一膜单管	49	32.17	116	29	13	165	42	19

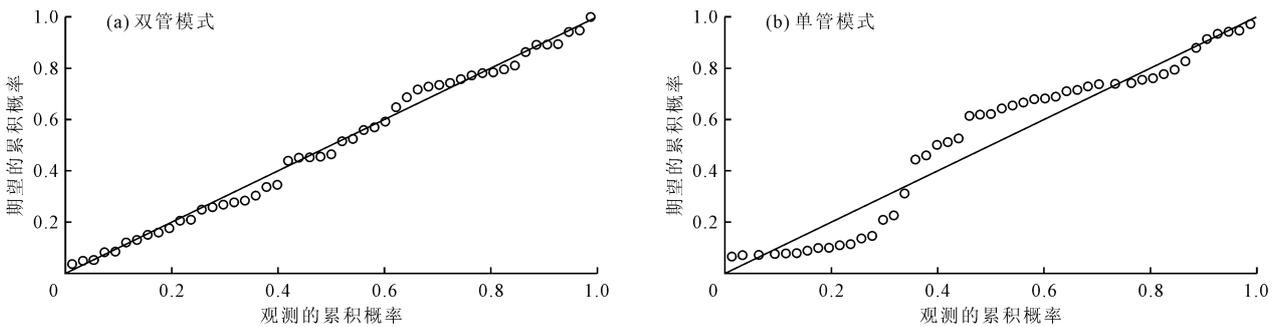


图 3 两种滴灌模式下土壤水电导率  $P - P$  正态概率图

表 3 两种滴灌模式的半方差函数拟合模型及参数

滴灌模式	模型	块金常数 $C_0$	拱高 $C$	基台值 $C_0 + C$	变程 /m	$[C_0 / (C_0 + C)] / \%$	$R^2$	RSS
一膜双管	Spherical	0.00359	0.0299	0.0335	64.87	10.7	0.982	$1.524 \times 10^{-6}$
	Gaussian	0.00919	0.0305	0.0397	67.24	23.2	0.997	$2.238 \times 10^{-7}$
	Exponential	0.00170	0.0481	0.0498	155.22	3.4	0.976	$2.005 \times 10^{-6}$
一膜单管	Spherical	0.00001	0.0202	0.0202	91.00	0	0.995	$2.356 \times 10^{-6}$
	Gaussian	0.00063	0.0158	0.0165	54.39	3.8	0.997	$1.114 \times 10^{-7}$
	Exponential	0.00010	0.0336	0.0337	273.00	0.3	0.992	$3.525 \times 10^{-6}$

由表 3 可知,两种模式的半方差函数拟合模型的  $R^2$  均趋近 1、残差 RSS 趋近于 0,故各拟合模型的精度均较高。在球状、高斯及指数这 3 种模型中,高斯模型的  $R^2$  最大、RSS 最小,故高斯模型为两种模式的最优半方差拟合模型。双管模式下最优拟合模型的基台值为 0.0397,是单管模式的 2.4 倍,表明双管模式下的土壤水电导率空间变异性较强。块金基台比( $C_0 / (C_0 + C)$ )表示空间变异性程度,即由随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比[16]。双管模式的球状、高斯和指数模型的块金基台比分别为 10.7%、23.2%、3.4%;单管模式分别为 0、3.8%、0.3%,均小于 25%,表明剖面土壤水电导率

具有十分强烈的空间相关性[26],且空间变异主要由结构性因素引起。同时,单管模式下由结构性因素引起的空间变异强于双管模式。双管模式下的球状、高斯和指数模型的变程分别为 64.87、67.24、155.22 m,而单管模式下分别为 91.00、54.39、273 m,对于剖面尺度来说,常规的取样深度多在数米土壤层内,远小于上述变程,这也是剖面土壤水电导率具有强空间相关性的体现。

### 3.4 根区土壤水电导率空间分布特征

选用克里格(Kriging)插值法,在最优半方差函数模型(Gaussian Model)的基础上,通过交叉验证方法对理论模型参数进行统计检验(表 4)。由表 4 中

的  $R^2$  和  $SE$  可知,两种模式拟合模型均具有较高的显著性,故选用 Kriging 空间插值具有较高精度。对比发现,双管模式下的  $R^2$  较小、 $SE$  较大,也表明双管模式下的剖面土壤水电导率数据离散性较强,交叉验证模型的拟合优度相对较差。

表4 两种滴灌模式土壤水电导率空间预测交叉验证

滴灌模式	拟合模型	$R^2$	$SE$
一膜双管	$y = 1.093x - 0.05$	0.530	0.150
一膜单管	$y = 0.974x + 0.01$	0.875	0.054

注: $y$ 为土壤水电导率观测值, $x$ 为估算值, $R^2$ 为决定系数, $SE$ 为标准误差。

通过 Kring 空间插值,获得两种滴灌模式的剖面土壤水电导率空间分布,见图4。由图4可看出,双管模式下土壤水电导率等值线呈“水滴”状分布,电导率峰值出现在剖面下部的“水滴”外围;而单管

模式下土壤水电导率等值线呈明显“条带”状分布,电导率峰值出现在剖面30~40 cm深度的最左侧的膜间部位,这是不同滴灌模式对剖面土壤盐分进行驱替,致使盐分重分布的体现。在滴头出流入渗作用下,土壤中的盐分随水分向湿润体的边缘聚集,且越靠近滴头处的盐分得到的淋洗效果越强。同时因不同滴灌模式滴灌带铺设位置不同,空间上即形成“条带”状和“水滴”状的电导率分布形态。汪昌树等<sup>[15]</sup>研究的一膜双管4行和一膜单管4行两种膜下滴灌方式下土壤盐分的运移规律也表明了这点。电导率等值线梯度变化也表明:两种模式的土壤水电导率整体上随土层深度的增加而增大,表明在滴灌条件下,剖面土壤盐分具有底聚现象,有引发次生盐渍化的风险,故对生育期盐分状态的实时监测和管理就显得尤为重要。

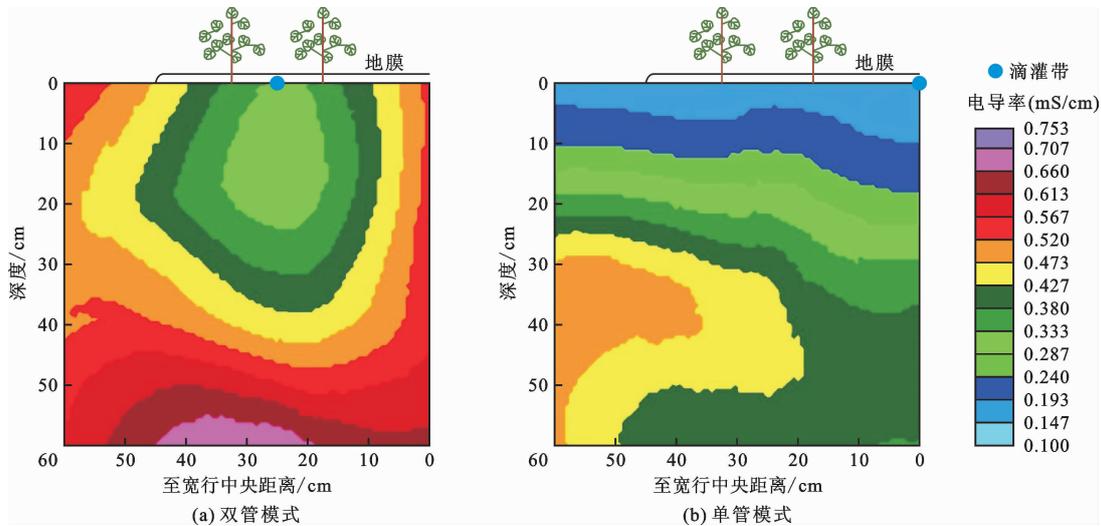


图4 两种滴灌模式剖面土壤水电导率空间分布

为便于比较两种膜下滴灌模式土壤水电导率的空间分布情况,根据监测数据对土壤水电导率进行分级(表5)。结合图4,分析可知,在0~60 cm深度土壤剖面,两种处理的土壤水电导率差异显著,在0~0.2 mS/cm段,双管模式下所占比例为0,单管模式下所占比例为10.22%;在0.2~0.4 mS/cm段,双管模式下所占比例为24.95%,是单管模式下的58.86%;在0.4~0.6 mS/cm段,双管模式下所占比例为62.56%,是单管模式下的1.31倍;在电导率值大于0.6 mS/cm段,双管模式下所占比例为12.49%,而单管模式下所占比例为0,故双管模式下的剖面土壤水电导率相对高值区面积明显大于单管模式。其原因主要为:在试验壤土条件下,相同灌

水定额时,双管模式的流量相对较小,对盐分的淋洗作用相对较弱;而单管流量则相对较大,滴头下方土壤较易达到饱水状态,而使得单管模式横向渗流扩展能力较强,对表层土壤盐分淋洗较为充分。

表5 两种滴灌模式的土壤水电导率各等级面积比 %

滴灌模式	电导率值等级/( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )			
	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	>0.6
一膜双管	0	24.95	62.56	12.49
一膜单管	10.22	42.39	47.39	0

## 4 结论

本研究通过 WET 探针对一膜单管和一膜双管

两种膜下滴灌模式 0 ~ 60 cm 深度的二维剖面土壤水电导率进行细致网格化监测,并进行统计特征值和地统计学分析,主要得出以下结论:

(1) 双管模式下土壤水电导率的最大值明显大于单管模式,且均值也较大,差异性达到了显著性水平 ( $P < 0.05$ );单、双管膜下滴灌模式的变异系数分别为 32.17% 和 30.25%,均为中等强度变异。

(2) 两种滴灌模式下电导率数据均服从正态分布;地统计学分析表明,两种模式的最优半方差函数拟合模型均为高斯模型;棉田土壤水电导率的空间变异主要由结构性因素引起;单、双管模式的变程均远大于常规土壤剖面采样尺度,两种模式的剖面土壤水电导率均具有较强的空间相关性。

(3) 单、双管剖面土壤水电导率空间分布表明,在试验壤土条件下,两者分别呈“条带”状和“水滴”状,单管模式具有更强的横向渗流扩展能力,对表层土壤盐分淋洗较为充分。

#### 参考文献:

- [1] CHEN Weiping, HOU Zhenan, WU Laosheng, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 2001 - 2008.
- [2] 吴忠东. 微咸水畦灌对土壤水盐分布特征和冬小麦产量影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [3] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 70 - 75.
- [4] WANG Zaimin, JIN Menggui, SIMUNEK J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(1): 15 - 27.
- [5] 黄金瓯, 靳孟贵, 栗现文. 咸淡水轮灌对棉花产量和土壤溶质迁移的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 99 - 107.
- [6] 陈文岭. 微咸水膜下滴灌棉花根系-水-盐-微量元素相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [7] 尹志荣, 张永宏, 桂林国, 等. 微咸水滴灌对枸杞产量及土壤水盐运动的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(7): 162 - 167.
- [8] LIU Meixian, YANG Jingsong, LI Xiaoming, et al. Effects of irrigation water quality and drip tape arrangement on soil salinity, soil moisture distribution, and cotton yield (*Gossypium hirsutum* L.) under mulched drip irrigation in Xinjiang, China[J]. *Journal of Integrative Agricultural*, 2012, 11(3): 502 - 511.
- [9] 马君, 师维军, 郭仁松, 等. 微咸水对滴灌棉花冠层光合特征及产量品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(24): 52 - 56.
- [10] 姚宝林, 李光永, 叶含春, 等. 干旱绿洲区膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化特征研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 151 - 161.
- [11] 栗现文, 靳孟贵, 袁晶晶, 等. 微咸水膜下滴灌棉田漫灌洗盐评价[J]. *水利学报*, 2014, 45(9): 1091 - 1098 + 1105.
- [12] 宋良群. 两种滴灌模式下棉田土壤水分和盐分的差异性分析[J]. *节水灌溉*, 2013(4): 5 - 7 + 11.
- [13] 邵建荣, 张凤华, 董艳, 等. 干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 216 - 221.
- [14] 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 不同滴灌方式对棉田土壤盐分的影响[J]. *水利学报*, 2011, 42(12): 1496 - 1503.
- [15] 汪昌树, 杨鹏年, 于宴民, 等. 膜下滴灌布置方式对土壤水盐运移和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 38 - 45.
- [16] 史文娟, 马媛, 徐飞, 等. 不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 585 - 593.
- [17] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J]. *土壤学报*, 2005(2): 247 - 252.
- [18] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 基于 EM38 的滨海棉田土壤表观电导率空间变异与利用研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 585 - 589.
- [19] 徐剑文, 孔杰, 赵君, 等. 盐胁迫下棉花萌发、成苗和产量相关性状的 QTL 定位[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34, 34(5): 972 - 977.
- [20] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 298 - 305.
- [21] 栗现文. 干旱区微咸水膜下滴灌棉田土壤水流系统及其应用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [22] 江贵荣. 干旱区不同尺度土壤盐分空间变异特征及不确定性分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [23] 李晓明, 杨劲松, 杨奇勇. 基于电磁感应的南疆典型田块土壤盐分空间异质性研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 167 - 170.
- [24] 杨劲松, 姚荣江. 基于磁感式土壤表观电导率空间变异性的插值方法比较[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 50 - 57.
- [25] 栗现文, 靳孟贵. 不同水质膜下滴灌棉田盐分空间变异特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 180 - 187.
- [26] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 310 - 316.