

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.34

干旱区土壤含水率和盐分的空间变异性及其关系研究

胡小东, 李仙岳, 冷旭, 孙亚楠

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明西北干旱区土壤水分和盐分的空间分布特征,在乌兰布和沙区布设38个样点,获取3个土层(0~10 cm、10~30 cm、30~50 cm)的土壤含水率和土壤EC数据,利用空间信息科学——统计学,同时结合经典统计学与长序列上的谱分析,对干旱区土壤水盐参数的空间分布特征进行分析。结果表明:干旱的乌兰布和地区土壤含水率、土壤EC的变异系数分别介于38%~57%和35%~98%,均属于中等偏弱变异程度,且两者变异系数随土层深度自上而下逐渐增大;研究区0~50 cm土层的土壤含水率和EC均值分别为7.09%~12.01%和0.16~0.28 $\mu\text{S}/\text{cm}$,30~50 cm土层含水率均值最大,对于整个干旱沙区,土壤水分和盐分含量普遍较小;由块金系数可知各深度土层的土壤含水率及EC值变化具有较强的空间相关性,最小变程大于采样间距,网格布设基本满足空间分析要求,但应缩小采样间距,增加采样点,以寻求最佳采样点间距;克里格插值结果显示,不同土层含水率呈逐月升高的趋势,土壤盐分则逐月降低,5月土壤表层(0~10 cm)盐分均值最大、分布最广;谱分析结果显示EC值在含水率序列上随生育期呈现先长程正相关(5月)后长程负相关(6~8月)。

关键词: 干旱区; 土壤含水率; 土壤EC; 空间变异; 谱分析

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0238-07

Spatial variability and relationship between soil water content and salt in arid area

HU Xiaodong, LI Xianyue, LENG Xu, SUN Ya'nan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to find out the spatial distribution characteristics of soil water and salt in the arid area of Northwest China, 38 sample sites were set up in Ulanbuh sandy area to obtain soil water content and EC data of three soil layers (i. e. 0–10 cm, 10–30 cm, and 30–50 cm respectively). The spatial distribution characteristics of soil water and salt parameters in the arid area were classified using geostatistics of spatial information science, combined with the classical statistics and long-range spectrum analysis. The results showed that the coefficients of variation of soil water content and EC were 38%–57% and 35%–98% respectively, both showing moderate and weak variations, and the variation gradually increased with the depth of soil layer from top to bottom. The average of soil water content and EC values were between 7.09%–12.01% and 0.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ –0.28 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively. The soil layer of 30–50 cm had the greatest average values. In the whole studied area, both soil water content and salt content was relatively small. There were strong spatial correlations between soil water content and EC in each depth of soil layers judged from the nugget coefficients, the minimum variation was greater than the sampling interval, and the grid layout basically met the requirements of spatial analysis. It is suggested to reduce sampling interval and increase sampling sites in order to find the optimal sampling site interval. Kriging interpolation results showed that the water content of different soil layers increased and the soil salt decreased month by month. The average values of salt in the soil surface layer (0–10 cm) were the largest and distributed the widest in May, 2018. The spectrum analysis showed that the EC had a positive

收稿日期:2020-05-31; 修回日期:2020-07-09

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(zdxc2018059),国家自然科学基金项目(51969024)

作者简介:胡小东(1997-),男,内蒙古包头人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。

通讯作者:李仙岳(1980-),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究。

correlation with the growth period in May and then a negative correlation from June to August, 2018.

Key words: arid area; soil water content; soil EC; spatial variability; spectrum analysis

1 研究背景

土壤是一种高度变异体,主要受到自然因素和人为因素共同作用使其成土,其形成过程十分复杂,因此土壤存在空间变异性^[1-2],特别是在干旱与半干旱地区,土壤贫瘠、水分短缺、土壤环境污染严重等因素导致土壤空间变异性较大、土壤变量的空间特性较为复杂。土壤空间变异性带来的问题逐渐成为科学家们关注的热点,定量描述分析各项土壤变量的空间特性已经成为农田水土环境研究中重要的部分之一。同时为了推动精细化农业的发展,量化研究及提高田间土壤的研究精度及土壤各项空间变量之间的关系具有重要意义^[3]。位于中国内陆的河套灌区是典型的盐渍化灌区,土壤水盐是该区农田生态环境的重要指标。

土壤盐渍化主要受自然和人为因素的影响,目前已经成为严重影响现代农业发展的生态性问题^[4-5],因此引起了世界各国学者对此的高度重视^[6-7],其中土壤水盐空间变异性研究是国内外水土环境等领域学者关注的热点之一^[8]。国内外许多专家学者已经利用不同研究方法针对土壤水盐空间变异性等问题进行了大量研究^[5]。我国从20世纪80年代开始了针对不同土壤的物理属性变异性进行研究,研究尺度也不断向更广阔的区域上发展^[9]。目前,针对土壤空间特性的研究方法主要包括地统计学法、自相关分析法、方差分析法和分形理论等^[10],其中地统计学是利用半方差函数进行土壤空间特性描述的一种方法,被广泛应用于土壤空间变异性研究中^[11-14]。工程领域外的土壤含水率的研究仍仅限于饱和含水率之内,而超过饱和含水率的土壤水分超出了水分研究的范畴^[15]。波谱分析法在长程序列分析中的应用较为广泛,旨在寻找系列的节律、周期或趋势^[16]。

本文运用地统计学理论定量研究干旱区土壤水盐空间变异性,并结合波谱分析研究土壤EC值在含水率序列上的长程关系,为客观地揭示农田土壤水盐空间变异特性与其精准调控提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区河套灌区磴口县沈乌灌域木垒滩节水试验站(东经106°9′~107°10′,

北纬40°9′~40°57′),监测区域面积为4.75 km²。该区域干旱缺水,年平均降雨量为143.9 mm,年平均蒸发量为2 327 mm,光热资源丰富,全年日照时长达3 209 h,年平均无霜期为136 d,6~8月份大于等于15℃的积温为2 200℃。试验区域内耕地多以砂壤土和壤砂土为主,土壤平均pH值为8.01,田间持水率为24.4%。试验区位置及土壤采样点分布示意图见图1。

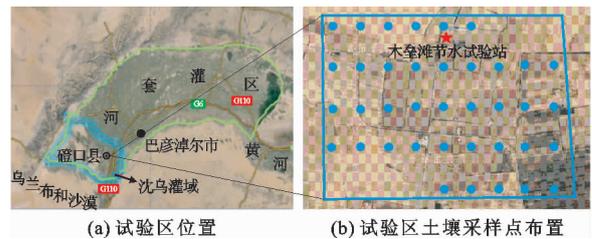


图1 试验区位置及土壤采样点分布示意图

2.2 采样点布设及样品采集

于2018年5~8月对试验区土壤进行样品的采集,具体时间选定为当地灌水后1周,采样点遵循网格布置原则,尽量均匀覆盖整个区域,并在实际取样中根据地形和人为因素(农田街道、居住房屋等)对部分取样点进行了调整,共计布设38个采样点(图1(b)),取样点间距为0.32 km左右。由于该区域种植作物主要为玉米和葵花,其根系活动区域主要集中在0~50 cm处,故本文将根系活动区域划分为3个深度土层进行研究,分别为0~10、10~30、30~50 cm。利用环刀和土钻进行土样采集,分别测定土壤容重和土壤质量含水率,并根据容重换算得到土壤体积含水率。同时,将一部分采集土样风干并过2 mm的筛子后配置成水土比5:1的土壤溶液进行电导率(electrical conductivity, EC)的测定。

2.3 研究方法

2.3.1 数理统计 将采集的土壤含水率和EC进行数据预处理,剔除异常值,运用经典统计学统计研究变量的各项特征值,并进行K-S检验,检验变量是否符合正态分布,若不符合正态分布需进行对数变换,方可构建半方差函数理论模型^[17-18]。变异系数公式如下:

$$C_v = S/\bar{x} \quad (1)$$

式中: S 为标准差; \bar{x} 为变量均值。

变异系数 C_v 值的大小反映了参数变量的变异性强弱^[19],即当 $C_v > 100\%$ 时表现为强变异性;当 $10\% < C_v < 100\%$ 时表现为中等变异性;当 $C_v <$

10% 时表现为弱变异性。

2.3.2 空间变异理论方法 地统计学法是以半方差函数为核心,通过克里格插值研究区域空间变异问题^[20-21]的方法。半方差函数公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中: h 为两样本点空间分隔距离或滞后距离,km; $N(h)$ 为滞后距离为 h 时的样本对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为随机变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的观测值。

2.3.3 谱分析方法 谱分析在长程序列分析中有着重要作用。根据其原理,首先延长数据序列,根据快速傅立叶变换(FFT)计算原理,变量序列长度满足 2^n ($n = 1, 2, 3, \dots$);然后利用 Matlab2016 将得到的序列值进行傅里叶分析,根据频率值和谱密度值绘制频率图;得到拟合公式 $P(f) \propto f^{-\beta}$,其中 β 为功率谱指数,对于 $d = 1$ 维的数据序列有如下转换:

$$\beta = 5 - 2D \quad (3)$$

$$D = 2 - H \quad (4)$$

式中: D 为自相似(幅谱)曲线的分维(fractal dimension); H 为赫斯特指数。

考虑“粒子”的分数布朗运动,赫斯特指数被定义如下^[16,22-23]:

$$R(r) = \frac{-x(-r)x(r)}{x(r)^2} = 2^{2H-1} - 1 \quad (5)$$

式中: $R(r)$ 为变量运动到某位置时,左右两个对称点的相关系数; $x(r)$ 为变量在某序列上运动的坐标点。

当 $H > 0.5$ 时: $D < 1.5$, $R(r) > 0$,此时粒子在

该序列上长呈正相关;当 $H = 0.5$ 时: $D = 1.5$, $R(r) = 0$,此时间隔的粒子无关;当 $H < 0.5$ 时: $D > 1.5$, $R(r) < 0$,此时粒子在该序列上长呈负相关。

2.4 数据处理方法

本文利用 Excel 2007 和 SPSS20.0 进行数据预处理,做经典统计学分析;采用 GS + 7.0 拟合适宜于不同土层土壤含水率和 EC 的半方差函数理论模型,分析空间分布特征的随机性和结构性^[24];利用 Surfer11.0 进行克里格(Kriging)插值并绘制土壤含水率与 EC 的平面等值线图;最后通过 Matlab2016 进行土壤 EC 值在含水率序列上的谱分析。

3 结果与分析

3.1 数据的正态分布性检验

对数据进行正态分布性检验是避免可能存在的比例效应而有效使用 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的必要前提^[25-27]。箱线图(Boxplot)是一种检验正态分布的统计图形,可粗略地看出数据是否具有对称性。通过对不同月份下不同土层土壤含水率和 EC 数据进行正态检验发现,大部分土层数据符合正态分布,个别土层数据不符合要求,经自然对数转化后均呈近似的正态分布,满足分析要求。2018年5月试验区不同深度土层的土壤含水率和 EC 的正态检验箱线图见图2。由图2可直观地看出,土壤含水率和 EC 值的中位数大部分不在上四分位数和下四分位数的中间,说明数据存在偏态现象;同时结合图2中上、下界可知,数据存在异常值,这可能是由于个别农田灌水后的土壤含水率较大以及盐分聚集导致检测数据偏大。

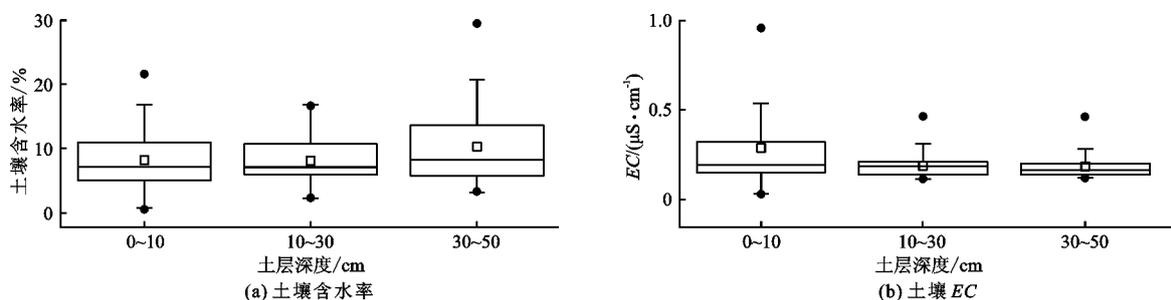


图2 试验区不同深度土层的土壤含水率和 EC 正态检验箱线图

3.2 不同深度土层土壤含水率和 EC 的统计特征值

表1为研究期试验区3个土层土壤含水率和土壤 EC 值的传统统计特征值。表1显示:(1)0~50 cm 土层内土壤含水率平均值在 7.09%~12.01%之间,随土层深度自上而下逐渐升高,30~50 cm 土层土壤含水率达到最高,且灌水及降雨频率较大的6月土壤含水率显著高于其他月份。Dai 等^[28]指出,田间持水量和凋

萎系数较高值分布在我国东南部地区,西北干旱半干旱地区较低,土壤含水率较低,这与西北地区较高的砂粒含量和较低的黏粒含量有关。(2)土壤 EC 均值为 0.16~0.28 $\mu\text{S}/\text{cm}$,对于干旱沙区,土壤盐分较低,5月土壤表层 EC 值相对较大,各层土壤 EC 值随作物生育期自上而下升高,说明降雨和灌水对土壤盐分起到了淋洗作用。(3)土壤含水率变异系数为 0.38~0.57,土

壤 EC 变异系数为 0.35~0.98,均属于中等偏弱变异性,这也与西北地区较高的砂粒含量有关。单样本 K-S 检验结果表明,土壤含水率和 EC 均为正态分布。

3.3 不同深度土层土壤含水率和 EC 的空间变异特征分析

土壤水盐空间结构性复杂,为探明该区域土壤含水率和土壤 EC 的空间结构性,采用 GS+7.0 对土壤含水率和 EC 进行半方差分析,拟合结果见表 2。由表 2 可见,土壤含水率和 EC 值均具有较小的块金值(0~0.04),表明随机因素引起的土壤变量变异性较小。结构比($C_0/(C_0+C)$)为随机变异占总变异的大小,表示空间变异相关性程度,通常在 0

~1 之间。各土层土壤含水率和 EC 的空间相关度均在 0~0.25 之间,说明自相关引起的空间变异性较强(结构因素包括土壤母质、地形、土壤类型等)^[9],具有强的空间依赖性。变程(A)常用来表示变量在某尺度上的空间变异性和相关程度^[29]且地统计学中要求最大网格间距不大于最小变程^[30]。本文取样间距为 0.32 km(小于表 2 中的最小变程 0.33 km),采样网格选取间距基本可满足空间分析的要求。5-8 月各土层土壤含水率和 EC 的平均变程分别为 0.48 和 0.55 km,而最佳采样点间距应小于变程的一半^[2],因此土壤含水率与土壤 EC 的采样间距应缩小,即相应增加采样点。

表 1 研究期试验区 3 个土层土壤含水率和 EC 值统计特征值

% , $\mu\text{S}/\text{cm}$

月份	土层/ cm	含水率						EC					
		最大值	最小值	平均值	标准差	C_v	K-S 检验	最大值	最小值	平均值	标准差	C_v	K-S 检验
5	0~10	21.58	0.68	8.15	4.13	0.51	0.79	0.95	0.03	0.28	0.23	0.81	1.77
	10~30	16.61	2.44	8.17	3.07	0.38	1.00	0.46	0.11	0.19	0.07	0.35	1.14
	30~50	29.57	3.16	10.24	5.71	0.57	0.97	0.46	0.12	0.18	0.07	0.37	1.14
6	0~10	19.71	1.92	9.00	4.36	0.49	0.85	0.50	0.11	0.20	0.08	0.39	1.11
	10~30	19.63	2.12	9.95	4.39	0.46	0.70	0.34	0.02	0.18	0.06	0.36	0.86
	30~50	24.11	3.78	12.01	6.42	0.54	1.16	1.30	0.10	0.24	0.23	0.98	2.17
7	0~10	13.18	1.91	7.09	2.84	0.41	0.41	0.78	0.09	0.20	0.13	0.65	1.77
	10~30	18.51	2.09	8.03	3.80	0.48	0.47	0.37	0.10	0.18	0.06	0.37	1.41
	30~50	18.25	2.70	9.71	4.22	0.44	0.52	0.56	0.10	0.20	0.10	0.52	1.04
8	0~10	15.16	1.40	7.89	3.70	0.47	0.65	0.56	0.10	0.16	0.08	0.49	1.61
	10~30	13.97	2.33	7.91	3.59	0.46	0.76	0.44	0.09	0.16	0.06	0.39	1.10
	30~50	18.87	1.92	9.67	4.79	0.50	0.68	0.63	0.09	0.19	0.11	0.57	1.36

表 2 研究期试验区 3 个土层土壤含水率和 EC 值半方差函数模型及参数拟合

月份	土层/ cm	含水率						EC					
		块金数	基台数	结构比	变程/ km	决定 系数	残差	块金数	基台数	结构比	变程/ km	决定 系数	残差
5	0~10	0.01	0.43	0.03	0.55	0.51	0.9×10^{-2}	0.31	1.11	0.25	0.66	0.84	6.29×10^{-3}
	10~30	0.01	0.16	0.04	0.43	0.46	0.00	0.01	0.09	0.14	0.52	0.93	2.09×10^{-5}
	30~50	0.00	0.28	0.00	0.34	0.49	0.1×10^{-2}	0.02	0.10	0.19	0.41	0.70	1.37×10^{-3}
6	0~10	0.03	0.32	0.10	0.57	0.81	0.1×10^{-2}	0.08	0.66	0.12	0.58	0.52	1.97×10^{-3}
	10~30	0.04	0.32	0.13	0.38	0.83	0.1×10^{-2}	0.01	0.27	0.03	0.50	0.05	4.53×10^{-3}
	30~50	0.04	0.33	0.11	0.40	0.65	0.2×10^{-2}	0.01	0.29	0.03	0.37	0.38	2.07×10^{-3}
7	0~10	0.03	0.25	0.11	0.61	0.79	0.1×10^{-2}	0.01	0.20	0.03	0.83	0.49	8.25×10^{-4}
	10~30	0.03	0.28	0.09	0.49	0.56	0.00	0.02	0.12	0.13	0.58	0.76	1.69×10^{-4}
	30~50	0.01	0.22	0.04	0.33	0.59	0.00	0.03	0.19	0.18	0.46	0.90	6.39×10^{-5}
8	0~10	0.01	0.33	0.03	0.63	0.53	0.2×10^{-2}	0.02	0.11	0.15	0.69	0.59	5.83×10^{-4}
	10~30	0.01	0.27	0.03	0.57	0.73	0.1×10^{-2}	0.00	0.10	0.00	0.55	0.80	1.34×10^{-4}
	30~50	0.01	0.31	0.04	0.42	0.42	0.4×10^{-2}	0.02	0.20	0.09	0.40	0.34	4.90×10^{-5}

3.4 不同深度土层土壤含水率和 EC 的空间分布

图3和4分别为研究期试验区3个土层土壤含水率和土壤 EC 空间分布等值线图。

由图3可以看出,不同月份含水率大致自北向南在逐渐增大,在中部区域存在较低含水率均值,东西部又逐渐升高。“岛状”斑块及其大小反映了土壤变量空间变异性的变化。0~10 cm 土层“岛状”较少而10~30 cm 和30~50 cm 土层“岛状”较多,存在极干或极湿的小区,归因于供试地块各土层间的孔隙连通性的差异,总体呈现表层(0~10 cm)干旱。从时间分布来看,5月含水率较低,6~8月因水

分补给充足而含水率相对较高,但特别地7月含水率分布低于6、8月,这可能是由于该区域主要作物为玉米和葵花,根层分布主要在10~50 cm,该月为作物生长旺季而需水量较大。

由图4结合表2中的结果表明,“盐随水去”的淋洗作用使得试验区总体含盐量较小,土壤盐分逐月降低,5月土壤表层盐分最大,面积最广,有返盐积盐现象,各月份土层盐分同含水率一样呈自北向南的扩散趋势,各层含水率较低的中部区域有明显的“圆状” EC 较高值,说明土壤含水率和土壤 EC 存在一定的联系。

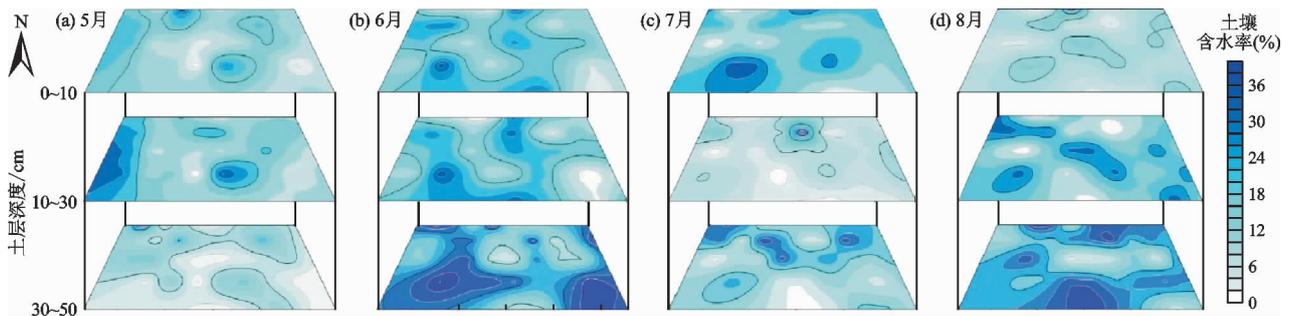


图3 研究期试验区3个土层土壤含水率等值线图

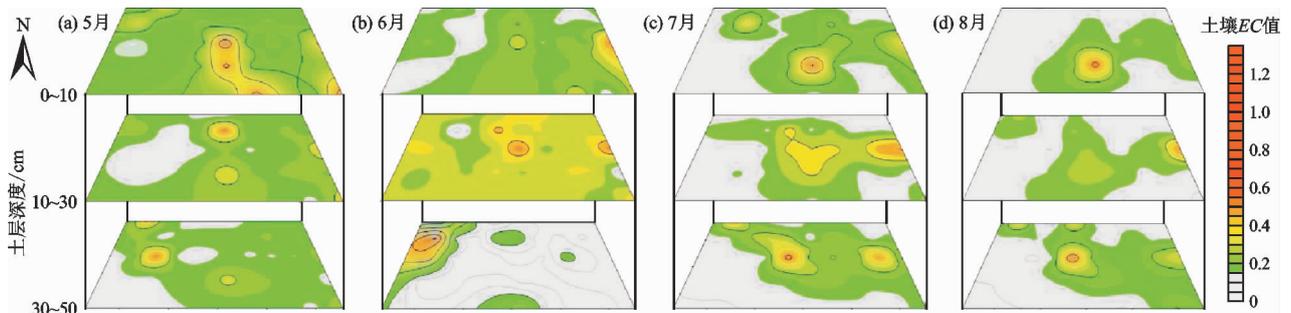


图4 研究期试验区3个土层土壤 EC 等值线图

3.5 土壤 EC 在含水率序列上的波谱分析

为了进一步分析土壤含水率与土壤 EC 之间的关系,本文采用谱分析法解释 EC 在土壤水分序列上的长程关系。根据空间序列的波谱分析原理,将现有的土壤含水率实测数据划分为若干个间隔,每个间隔作为距离序列,同时计算每个间隔内的 EC 均值作为变量序列。首先,延长数据序列,本文将0~50cm 土层土壤含水率以1.85%步长划分为16个间隔,即 $T = 16$,以0.6%体积含水率为起始点,变化范围在0.6%~30.2%之间。处理后的部分(5月)数据见表3。利用 Matlab2016 将表3中含水率序列上的 EC 值中心化,然后对其进行傅里叶变换;频率值(f)等于波数除以 T ,波数为0~15,;谱密度值 $P(f)$ 利用 IMPRODUCT 函数进行计算。不同月份各土层数据处理

后得到的谱密度值(除0点)均以对称轴 $f = 0.5$ 为对称,将5月份前半部分数据列于表4。

其余各月数据均采用以上过程进行处理,根据频率值和谱密度值绘制波谱关系图,拟合结果如图5所示,图5(a)为自动拟合结果,为了便于直观地分析,将其横、纵坐标对数化,得到对数拟合结果如图5(b)所示。

由图5可知,拟合优度 R^2 逐月降低,介于0.143~0.490之间,说明土壤含水率与土壤 EC 的相关性随生育期逐渐减弱,5~8月的 β 值分别为2.57、1.29、1.85、0.66。将 β 值代入公式(3)、(4)中计算得到相应的 H 指数分别为0.785、0.145、0.425、-0.170,由此得出5月 EC 在含水率序列上长程正相关,而6~8月 EC 在含水率序列上长程负相关。

此结论说明随生育期灌水量和降雨量增多,在土壤和水的混合介质中水对 EC 值产生了一定的影响,混合介质的 EC 随含水率的升高呈先升高后降低趋

势,即在介质含水率长程序列上,5 月土壤 EC 值与含水率呈现正相关性关系,6-8 月土壤 EC 值与含水率呈现负相关性关系。

表3 试验区部分(5月)土壤含水率序列上对应的 EC 值

序号	土壤含水率/%	EC / ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	序号	土壤含水率/%	EC / ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0	2.45	0.250	8	17.25	0.233
1	4.30	0.208	9	19.10	0.388
2	6.15	0.241	10	20.95	0.300
3	8.00	0.214	11	22.80	0.198
4	9.85	0.169	12	24.65	0.275
5	11.70	0.187	13	26.50	0.250
6	13.55	0.214	14	28.35	0.320
7	15.40	0.178	15	30.20	0.367

表4 部分(5月前半部分数据)波谱分析计算结果

序号	傅里叶变换 FFT	频率值 f	谱密度值 $P(f)$
0	-6.313×10^{-4}	0	7.57×10^{-5}
1	$8.865 \times 10^{-2} + 0.407i$	0.0625	5.455
2	$-0.245 - 2.389 \times 10^{-2}i$	0.125	0.597
3	$-8.460 \times 10^{-2} + 0.333i$	0.1875	1.355
4	$-0.149 - 7.581 \times 10^{-2}i$	0.2500	0.153
5	$5.312 \times 10^{-2} + 0.312i$	0.3125	0.775
6	$-0.168 - 1.100 \times 10^{-2}i$	0.3750	0.941
7	$1.124 \times 10^{-2} - 3.906 \times 10^{-2}i$	0.4375	0.958
8	9.607×10^{-3}	0.5000	0.050

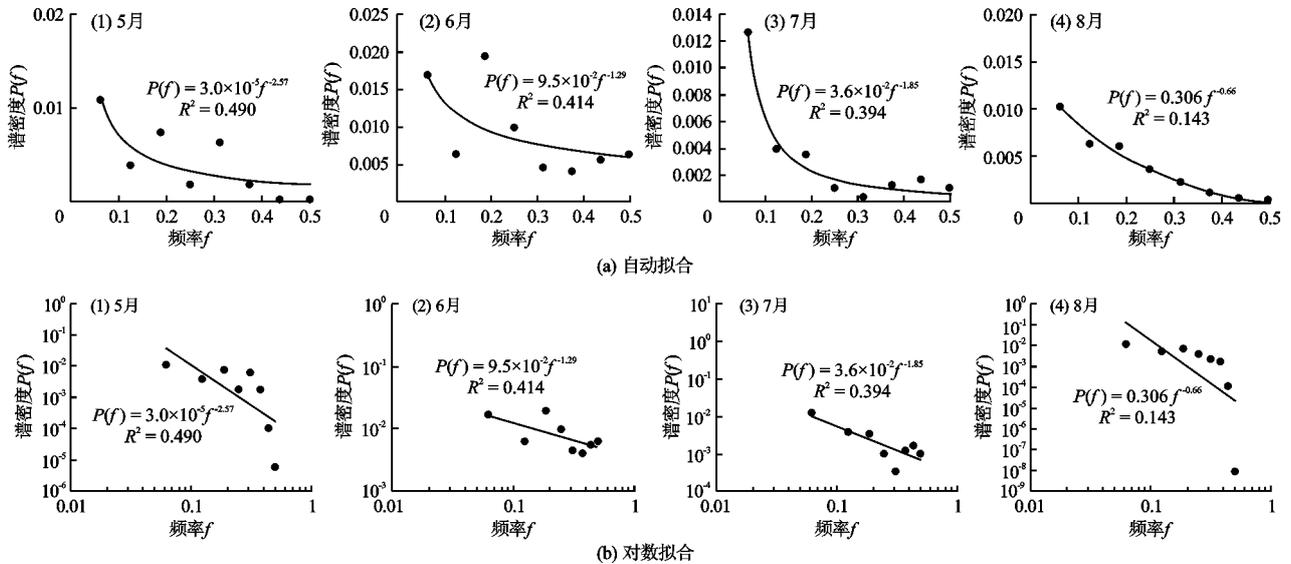


图5 不同月份波谱分析拟合结果

4 讨论

对研究区不同深度土层的土壤含水率、EC 值进行传统统计分析以及克里格插值,结果表明不同深度土层的土壤在中部区域存在较低的含水率均值,并自上而下有逐渐增多的“岛状”斑块,表层土壤(0~10cm)干旱;不同深度土层土壤含水率逐月升高,土壤盐分逐月降低,5 月土壤表层盐分均值最大、分布最广,各层含水率较低的中部区域有明显的“圆状”EC 较高值,说明土壤含水率与土壤 EC 值存在一定的联系。通过空间序列的波谱分析,拟合优度 R^2 的变化说明土壤含水率与土壤 EC 的相关性随作物生育期逐渐减弱。综上所述,对于干旱沙区,气候干旱,土壤水分较小且空间分布不均匀,土壤盐

分较低,土壤水分与土壤盐分具有一定的空间变化关系。

5 结论

对研究区农田区域尺度实测土壤含水率和土壤 EC 空间变异性分析,主要结论如下:

(1) 土壤含水率和土壤 EC (个别土层数据经自然对数化)均基本符合正态分布;两者均属于中等变异性,作物生育期各月不同深度土层含水率均值为 8.985%,土壤 EC 为 0.197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

(2) 土壤含水率和 EC 值的块金比均小于 0.246,随机因素引起的空间变异程度较低,存在强烈的空间相关性;变程的大小反映本次试验采样网格间距的选取可满足空间分析的要求。

(3)对不同层度的土壤含水率、*EC* 进行克里格插值,结果表明二者均呈自北向南呈扩散趋势;谱分析 *H* 指数的变化说明 *EC* 值在含水率序列上随作物生育期呈现先长程正相关(5月)后长程负相关(6-8月)。

参考文献:

- [1] 华孟,王坚. 土壤物理学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1993.
- [2] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 杨玉玲,文启凯,田长彦,等. 土壤空间变异研究现状及展望[J]. 干旱区研究,2001,18(2):50-55.
- [4] 李素艳,翟鹏辉,孙向阳,等. 滨海土壤盐渍化特征及土壤改良研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(6):1069-1078.
- [5] TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, MINASNY B, SARMA-DIAN F, et al. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran [J]. Geoderma, 2014,213:15-28.
- [6] 赵丽蓉,黄介生,伍靖伟,等. 水管理措施对区域水盐动态的影响[J]. 水利学报,2011,42(5):514-522.
- [7] DARWISH T, ATALLAH T, MOUJABBER M E, et al. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1-2):152-164.
- [8] ABDELFAHATTAH M A, SHAHID S A, OTHMAN Y R. Soil salinity mapping model developed using RS and GIS: A case study from Abu Dhabi, United Arab Emirates [J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 26(3):342-351.
- [9] 王全九,毕磊,张继红. 新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征[J]. 农业工程学报,2018,34(18):138-145+316.
- [10] 刘全明,陈亚新,魏占民,等. 土壤水盐空间变异性指示克立格阈值及其与有关函数的关系[J]. 水利学报,2009,40(9):1127-1134.
- [11] 杨卫中,王一鸣,李保国. 土壤含水量空间变异性的频域分析方法[J]. 水利学报,2011,42(5):580-587.
- [12] 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.
- [13] 史海滨,吴迪,闫建文,等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):318-331.
- [14] SHI Zhou, LI Yan, WANG Renchao, et al. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field [J]. Environmental Geology, 2005, 48(2):171-178.
- [15] 李建波,王卫华, SU Yiming, 等. 温室土壤含水率与导热率空间分布及相关性[J]. 农业工程学报,2016,32(19):127-132.
- [16] 陈彦光. 基于 Excel 的地理数据分析[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [17] 卢鑫,胡文友,黄标,等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学,2018,39(3):1421-1429.
- [18] 胡克林,李保国,吕贻忠,等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较[J]. 环境科学,2004,25(3):132-137.
- [19] WARRICK A W, NIELSEN D R. Spatial variability of soil physical properties in the field [M] //HILLEL D. Applications of Soil Physics. New York:Academic Press, 1980:319-344.
- [20] SYLLA M, STEIN A, BREEMEN N V, et al. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove riceagro-ecosystem in West Africa [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1995,54(1-2):1-15.
- [21] 周慧珍,龚子同, LAMP J. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报,1996,33(3):232-241.
- [22] 陈彦光,刘继生. 城市人口分布空间自相关的功率谱分析[J]. 地球科学进展,2006,21(1):1-9.
- [23] FEDER J. Fractals [M]. New York:Plenum Press, 1988.
- [24] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. 地理学报,2012,67(11):1547-1555.
- [25] ROSSI R E, MULLA D J, JOURNEL A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence [J]. Ecological Monographs, 1992, 62(2):277-314.
- [26] 李海滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报,1998,9(6):651-657.
- [27] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报,2000,55(5):555-566.
- [28] DAI Yongjiu, SHANGGUAN Wei, DUAN Qingyun, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(3):869-887.
- [29] 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.
- [30] RUSSO D, JURY W A. A theoretical study of the estimation of the correlation length scale in spatially variable fields:2. Nonstationary fields [J]. Water Resources Research, 1987, 23(7):1269-1279.