

盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及 地下水埋深对盐分的影响

窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 田峰, 于丹丹, 周利颖, 梁志航

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对盐渍化灌区土壤盐渍化问题, 以河套灌区下游乌拉特灌域为研究区, 通过野外实测与室内试验分析结合, 采用统计学方法地质统计学原理分析表层土壤(0—20, 20—40 cm)及深层土壤(40—100 cm)含水率与盐分(EC值)时空分布和变异规律, 以及探求地下水埋深对土壤盐分的影响。结果表明:(1)除6月0—20 cm(9.779%)外, 表层土壤含水率变异系数均在12.384%~19.667%, 属于中等变异性, 深层土壤含水率变异系数较小, 在3.513%~9.757%, 属于弱变异性; 表层土壤盐分(EC值)变异系数在100.845%~129.279%, 属于强变异性, 深层土壤盐分变异系数均在83.685%~98.853%, 属于中等变异性; 随着土壤深度的增加, 含水率和盐分的变异性都相对减弱。(2)不同时期土壤含水率和盐分在一定范围内具有空间结构特征, 均可用高斯模型模拟, 各层土壤含水率空间相关度在0.038%~20.408%, 各层土壤盐分空间相关度在0.043%~8.374%, 均小于25%, 说明具有强烈的空间相关性, 可以认为主要是受结构性因素的影响, 其自相关引起的空间变异性较强。(3)试验区土壤盐分主要集中在北侧盐荒地, 由于蒸发强烈, 包气带毛细水上升, 把深层土壤以及地下水中的可溶性盐类带到土壤表层, 致使盐分升高, 属于典型的盐分表聚型土壤, 需及时防治与治理, 同时土壤盐分受地下水埋深的影响较大, 随着地下水埋深减小而增大, 荒地地下水埋深与土壤盐分满足线性关系, 耕地地下水埋深与土壤盐分满足指数关系。荒地0—20 cm土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较大, 20—40, 40—100 cm土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较小, 耕地地下水埋深在1~1.6 m时, 土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较大, 当地下水埋深大于1.6 m时, 土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较小。研究结果为河套灌区下游盐渍化土壤的防治与改良提供了重要的理论基础和参考依据。

关键词: 盐渍化; 水盐特征; 时空变异; 地质统计学原理; 地下水埋深

中图分类号: S287

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0246-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.037

Temporal and Spatial Variability Analysis of Soil Water and Salt and the Influence of Groundwater Depth on Salt in Saline Irrigation Area

DOU Xu, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, TIAN Feng, YU Dandan, ZHOU Liying, LIANG Zhihang

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

Abstract: Aiming at the problem of soil salinization in salinized irrigation area, the Urad irrigation area in the lower reaches of Hetao Irrigation District was taken as the research area, the spatial and temporal distribution and variation of water content and salinity (EC value) in surface soil (0—20 and 20—40 cm) and deep soil (40—100 cm) as well as the influence of groundwater depth on soil salinity were analyzed by the method of field measurement combined with laboratory experiment and statistical method of geostatistics. The results showed that: (1) Except for 0—20 cm in June (9.779%), the variation coefficient of surface soil water content was 12.384% ~ 19.667%, which was moderate variability, and the variation coefficient of deep soil water content was small (3.513% ~ 9.757%), which was weak variability. The variation coefficient of EC in surface soil was between 100.845% and 129.279%, which was a strong variability, while that in deep soil was between 83.685% and 98.853%, which was moderate variability. With the increasing of soil depth, the variability of water content and salinity decreased. (2) The soil water content and salinity in different periods had spatial structure characteristics within a certain range, which could be simulated by Gaussian model. The spatial correlation of soil water content in each layer was 0.038% ~ 20.408%, and the spatial correlation of

收稿日期: 2018-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(51879132, 51769024); 内蒙古科技重大专项(2060901); 内蒙古水利科技重大专项(n5k2018-M5)

第一作者: 窦旭(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事灌溉理论与新技术研究。E-mail: 1161927928@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与新技术研究。E-mail: shi_haibin@sohu.com

soil salinity in each layer was 0.043% ~ 8.374%, both were less than 25%, indicating a strong spatial correlation, and this could be considered to be mainly caused by structural factors, and the spatial variability caused by autocorrelation was strong. (3) The soil salinity in the research area was mainly concentrated in the north salt wasteland. Due to strong evaporation, the capillary water in the aerated zone raised, and the soluble salts in the deep soil and groundwater were brought to the surface layer of the soil, resulting in the increasing of salinity, which was the typical salt-accumulation type. The immediate control and treatment were needed. At the same time, the soil salinity was greatly affected by the groundwater depth, the soil salinity increased with the decreasing of the groundwater depth. The relationship between the groundwater depth of the wasteland and the soil salinity satisfy was linear, and the relationship between the groundwater depth and soil salinity of the cultivated land was exponential. The soil salinity content in the 0—20 cm soil of the wasteland varied greatly with the depth of groundwater. The change trend of soil salinity with the depth of groundwater was smaller in 20—40 cm and 40—100 cm layers. When the groundwater depth of the cultivated land was 1 ~ 1.6 m, the soil salinity content changed greatly with the depth of groundwater. When the groundwater depth was more than 1.6 m, the soil salinity content changed little with the groundwater depth. This study provided an important theoretical basis and reference for the prevention and improvement of salinized soil in the lower reaches of Hetao Irrigation District.

Keywords: salinization; characteristics of water and salt; temporal and spatial variability; principle of geostatistics; groundwater depth

内蒙古河套灌区位于干旱、半干旱地区,是全国三大灌区之一,总控制面积 11 190 km²,灌溉面积 5 743 km²,具有丰富的土地和光热资源,是我国重要的粮食生产基地^[1]。但由于降雨稀少,蒸发强烈,地下水矿化度高,土壤盐渍化一直是困扰该地区农业生产的突出问题,是制约灌区农业可持续发展关键因素,影响农牧业生产,河套灌区目前的盐渍化面积约 33.33 万 hm²,占总耕地的 63.8%,另外还有继续蔓延的趋势^[2]。土壤盐渍化已经成为当今社会土地的主要问题,因此,及时掌握土壤水盐时空分布特征和地下水埋深对土壤盐分的影响,把握水盐运移规律是进行土壤盐渍化治理与实施科学耕作和灌溉的重要依据,也是改良与利用盐碱地的首要问题^[3]。

由于土壤盐分分布是时空连续的变体,具有高度的空间异质性。土壤盐分的空间变异性在一定程度上反映了土壤植被根层内的盐渍化程度和状态^[4]。因此,利用地质统计学方法研究探讨土壤含水率和盐分的空间异质性,能够更加有效、直观地表征区域含水率和盐分的分布及其变化特征,通过对土壤含水率与盐分空间变异特征分析,了解和把握土壤含水率与盐分随时间与空间的变化规律,从而为当地精确改良与利用盐碱地提供理论依据。

目前,国内外关于研究水盐时空变异的研究已有很多,朱金余等^[5]揭示天津开发区绿地盐分时空变异特征,为该区域绿地的各项排碱治盐工程以及绿地管护工作提供理论依据,刘迁迁等^[6]在伊犁察南灌区研究表明,随着时间的推移,非盐化土面积显著减小,中度盐化土面积显著增加,非盐化土、轻度盐化土向中

度盐化土演变,且土壤盐分含量总体上呈现逐年加重的趋势,因此导致土壤盐渍化,并且需及时治理,以防土壤盐渍化程度日益严重,内蒙古河套灌区是土壤次生盐渍化的典范,近年来由于大规模发展节水灌溉导致农田水盐状态改变,土壤次生盐渍化问题再次凸显^[7],本文通过田间试验,研究不同时期各层土壤水盐时空变异以及地下水埋深对土壤盐分的影响,以掌握土壤水盐时空分布以及土壤水盐运移规律,为盐碱地治理和改良提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

试验于 2018 年 4—9 月在乌拉特灌域进行,试验区位于内蒙古巴彦淖尔市河套灌区下游乌拉特灌域西山咀农场四分场、五分场,东起京藏高速公路,西到四分场田间路,南以十分渠为界,北至十排干,见图 1;地理位置东经 108°37'28"—108°39'49",北纬 40°44'54"—40°45'49",海拔 1 017.97~1 019.95 m。试验区东西宽约 2.39 km,南北长约 1.7 km。总土地面积 400 hm²。其中种植利用面积 200 hm²,盐荒地 200 hm²,试验区地处中温带大陆性气候区,气温多变,干燥多风,日照充足,光能丰富,降水少,蒸发强,无霜期较短。试验区多年平均气温 6~8 ℃,极端最低气温 -36.7 ℃,极端最高气温 36.4 ℃;降雨主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 70%,多年平均降水量 196~215 mm,多年平均蒸发量为 2 172.5 mm;多年平均无霜期 130 d;多年平均风速 2.5~3.0 m/s;多年平均日照时间 3 230.9 h;最大冻土深度为 1.2 m。

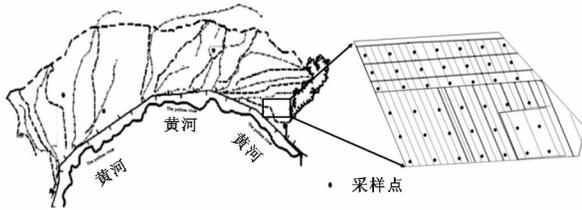


图 1 研究区和采样点分布示意

1.2 试验设计

试验区以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网格布置,于网格节点处设立采样点,共 150 个采样点,并设 9 处垂直剖面进行土壤各项指标的测试,采用土钻法采集土壤 1 m

深度,共 5 层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm)进行土壤基础数据采集与测定,试验区各层土壤物理性质见表 1,根据研究区土壤盐碱状况、土壤质地、植被长势,结合路网、沟渠分割情况确定以 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的网格布置采样点,共 42 个采样点,以手持全球定位系统(GPS)定位仪测定实地坐标。每个样点测 2 次重复,共 84 组土壤数据带回室内实验室进行测量。采样时间为每月 1 次。在荒地与耕地各布设 2 眼地下水位观测井用于观测地下水位与水质。

表 1 试验区土壤物理性质

试验区	土层深度/cm	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤类型	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/ ($10^{-5}\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
荒地	0—20	1.426~1.464	粉土	0.352~0.354	0.219~0.230	3.939
	20—40	1.468~1.472	粉质壤土	0.360~0.365	0.238~0.242	3.798
	40—60	1.470~1.476	粉土	0.346~0.351	0.240~0.246	1.238
	60—80	1.483~1.488	粉土	0.340~0.347	0.229~0.234	2.073
	80—100	1.485~1.490	粉土	0.348~0.353	0.239~0.241	5.176
改良耕地	0—20	1.451~1.458	粉质壤土	0.331~0.336	0.220~0.224	19.180
	20—40	1.462~1.469	粉质壤土	0.335~0.342	0.235~0.239	4.639
	40—60	1.463~1.470	粉质壤土	0.332~0.340	0.240~0.250	4.753
	60—80	1.470~1.479	粉质壤土	0.342~0.349	0.231~0.238	1.769
	80—100	1.480~1.483	粉质壤土	0.350~0.360	0.220~0.223	28.000

1.3 数据处理

利用 Excel 软件分析数据与制图,利用 GS+9.0 软件对不符合正态分布的数据源进行对数转换,经过计算、模拟与检验,得出的半方差函数模型,在 ArcGIS 10.5 软件中利用 Kriging 最优内插法绘制土壤盐分空间分布特征图;样本描述性和相关性分析采用 SPSS 22.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同时期各层土壤含水率、盐分(EC 值)统计特征分析

变异系数的大小反映样点的空间变异性,当 $CV \leq 10\%$ 时,为弱变异性,当 $10\% < CV < 100\%$ 时,为中等变异性,当 $CV \geq 100\%$ 时,为强变异性共 3 个等级^[8]。

由表 2 可知,从不同时期各层土壤含水率变幅及平均值来看,7 月底受降雨的影响,8 月含水率明显高于其他月份,4 月春灌结束之后土壤含水率较高,随着气温、地温升高,蒸发强烈,导致表层土壤(0—20, 20—40 cm)含水率逐渐降低,深层土壤(40—100 cm)含水率也随之降低,而 9 月由于气候干燥,蒸发强烈,导致含水率又开始降低。从含水率变异系数来看,表层土壤含水率变异系数除 6 月 0—20 cm(9.779%)外,均在 12.384%~19.667%,属于中等变异性,6 月葵花耕种并且开始生长,土壤 0—20 cm 土壤含水率变化较小;深层土壤含水

率变异系数较小,在 3.513%~9.757%,属于弱变异性。该差异的出现其重要原因是由于气候、地势和人为等因素的差异引起的水分分布不均匀。

表 3 是不同时期土壤盐分(EC 值)的描述性分析结果,从盐分变幅和平均值来看,试验区表层土壤(0—20, 20—40 cm)盐分明显大于深层土壤(40—100 cm)。表层土壤盐分平均值在 1.300~3.888 dS/m,大约是深层土壤的 1.16~3.64 倍,其原因为河套灌区夏季气温高、降水少,蒸发量不断增大,加之盐荒地无灌溉淋洗,地下盐分随毛管上升,在地表形成高盐分聚集区,且试验区每月都有盐分最大值超过 5 dS/m,部分地块盐渍化程度较高,属于典型的表聚型土壤,需要及时治理与调控。从变异系数来看,表层土壤盐分变异系数在 100.845%~129.279%,均大于 100%,属于强变异性,深层土壤变异系数均在 83.685%~98.853%,位于 10%~100%,属于中等变异性。试验区受地势、气候和人为等因素的影响土壤盐分运移也随之受到影响,表层土壤盐分受这些因素的影响更显著,所以土壤返盐程度存在比较大的差异,表层土壤盐分变异明显,而随着土层深度的增加土壤盐分受这些因素的影响减弱,变异强度随之降低。土壤盐分的变异明显大于含水率的变异,表明土壤盐分的空间依赖性强于土壤含水率^[9]。

表 2 不同时期各层土壤含水量统计特征

月份	土层深度/cm	样本数	最小值/ %	最大值/ %	平均值/ %	标准差	变异系/ %	偏度 系数	峰度 系数
4	0-20	42	16.058	33.763	24.337	0.046	0.190	0.053	2.236
	20-40	42	20.535	39.174	29.375	0.045	0.153	0.105	2.833
	40-100	42	25.258	37.346	31.225	0.022	0.070	0.053	3.983
5	0-20	42	14.950	28.350	21.754	0.033	0.154	-0.078	2.239
	20-40	42	19.557	33.296	26.290	0.033	0.124	0.001	3.100
	40-100	42	24.523	29.403	29.403	0.018	0.061	-0.165	3.468
6	0-20	42	18.022	25.157	21.256	0.021	0.098	0.356	2.135
	20-40	42	14.178	29.811	24.381	0.036	0.148	-0.675	3.504
	40-100	42	19.835	31.757	28.470	0.024	0.085	-1.604	6.897
7	0-20	42	13.456	26.379	19.269	0.032	0.166	0.377	2.274
	20-40	42	11.373	30.386	23.198	0.043	0.184	-0.963	4.145
	40-100	42	24.014	32.529	28.121	0.019	0.066	0.082	3.729
8	0-20	42	15.532	26.620	22.385	0.032	0.144	-0.606	2.526
	20-40	42	20.861	33.231	26.885	0.033	0.124	-0.166	2.240
	40-100	42	28.103	32.400	30.462	0.011	0.035	0.083	2.570
9	0-20	42	12.660	26.649	18.642	0.037	0.197	0.282	2.288
	20-40	42	14.384	28.823	22.637	0.040	0.177	-0.370	2.355
	40-100	42	21.056	34.188	28.698	0.028	0.098	0.197	3.009

表 3 不同时期各层土壤盐分统计特征

月份	土层深度/cm	样本数	最小值/ (dS·m ⁻¹)	最大值/ (dS·m ⁻¹)	平均值/ (dS·m ⁻¹)	标准差	变异 系数/%	偏度 系数	峰度 系数
4	0-20	42	0.570	12.960	2.909	3.754	129.055	1.579	4.002
	20-40	42	0.324	5.502	1.300	1.443	110.960	1.631	4.490
	40-100	42	0.231	1.512	1.343	1.287	95.859	1.037	2.636
5	0-20	42	0.313	14.295	3.745	4.787	127.844	1.163	2.763
	20-40	42	0.321	8.050	2.101	2.427	115.543	0.586	1.797
	40-100	42	0.236	5.013	1.474	1.439	97.646	1.041	2.634
6	0-20	42	0.321	12.135	3.888	3.933	101.178	0.736	2.117
	20-40	42	0.268	8.120	2.338	2.454	104.953	0.216	1.449
	40-100	42	0.322	8.207	2.367	2.265	95.678	0.946	2.932
7	0-20	42	0.257	16.670	3.444	4.349	126.300	1.446	4.269
	20-40	42	0.260	7.050	1.900	2.082	109.629	0.349	1.616
	40-100	42	0.228	5.800	1.622	1.603	98.853	1.238	3.288
8	0-20	42	0.230	8.555	2.886	2.910	100.845	0.762	2.025
	20-40	42	0.248	7.070	1.894	1.994	105.268	0.260	1.592
	40-100	42	0.221	5.560	1.776	1.486	83.685	0.938	2.958
9	0-20	42	0.195	11.266	2.955	3.471	117.474	0.896	2.312
	20-40	42	0.192	8.484	1.727	2.233	129.279	0.624	1.864
	40-100	42	0.216	5.670	1.336	1.228	91.923	1.482	4.597

2.2 不同时期土壤含水率、盐分(EC值)空间结构分析

为了进一步明确土壤水盐时空分布的结构特征,应用 GS+9.0 地统计学方法对土壤水盐的空间变异性进行分析。对不同时期各层土壤含水率和盐分进行空间变异理论模型拟合,理论模型及模型各参数结果见表 4、表 5。各层土壤含水率与盐分的半方差函数符合高斯模型。空间相关性是由随机因素和土壤自身结构性因素共同作用的结果,其中随机因素(耕作、管理措施、种植制度)的影响使得同一层面的空间相关性减弱,而结构因素(土壤母质、地形、土壤类型)使同一层面的空间相关性增强。 $C_0/(C+C_0)$ 表示块基比(也作块金系数),即块金值与基台值之比,代表空间异质性程度,按照区域化变量空间相关

性程度的分级标准,根据其值可以将空间相关性分为 3 级,当块金系数 $<25\%$ 时,说明具有强烈空间相关性,由结构因素引起的空间异质性较大;当块金系数在 $25\% \sim 75\%$ 时,表明具有中等空间相关性,由结构因素与随机因素共同影响空间异质性;当块金系数 $>75\%$ 时,说明空间相关性很弱,由随机因素引起的空间异质性较大^[8]。

对不同时期各层土壤含水率进行空间变异理论模型拟合,模拟结果见表 4,各层土壤其决定系数在 $0.562 \sim 0.927$,可以认为达到显著性水平,残差小于 0.0001 ,说明拟合模型有效,其中所有的指标块金值 C_0 都比较小,可认为它们在研究区范围内的取样间距已经比较合理。各层土壤含水率模拟均符合高斯模型,高

斯模型是用高斯概率密度函数(正态分布曲线)精确地量化的事物,将一个事物分解为若干的基于高斯概率密度函数形成的模型,土壤含水率空间相关度在 0.038%~20.408%,均小于 25%,说明具有强烈的空间相关性,土壤含水率变化主要是受结构性因素(土壤母质、地形、土

壤类型)的影响,随机因素(耕作、管理措施、种植制度)占总变异很小,自相关引起的空间变异性较强,且 0—20 cm 的块金值明显大于其他土层,说明土壤含水率随土层深度的增加受结构因素影响增强,原因为土壤受耕作、管理措施,种植制度等随机因素影响较小。

表 4 不同时期各层土壤含水率的变异函数理论模型及相关参数

月份	土层深度/cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比/%	决定系数 R^2	残差 RSS
4	0—20	高斯	0.00350	0.04370	8.009	0.910	8.915×10^{-5}
	20—40	高斯	0.00001	0.02602	0.038	0.824	1.051×10^{-4}
	40—100	高斯	0.00015	0.01091	1.375	0.779	5.360×10^{-8}
5	0—20	高斯	0.00016	0.00130	12.308	0.647	1.330×10^{-7}
	20—40	高斯	0.00010	0.01662	0.602	0.700	9.286×10^{-5}
	40—100	高斯	0.00001	0.00428	0.234	0.683	3.581×10^{-6}
6	0—20	高斯	0.00010	0.00049	20.408	0.894	1.794×10^{-8}
	20—40	高斯	0.00381	0.02802	13.597	0.704	7.025×10^{-5}
	40—100	高斯	0.00001	0.00526	0.190	0.854	5.310×10^{-6}
7	0—20	高斯	0.00061	0.01220	5.000	0.562	1.571×10^{-7}
	20—40	高斯	0.00010	0.05540	0.181	0.852	4.204×10^{-4}
	40—100	高斯	0.00010	0.00530	1.887	0.832	4.586×10^{-7}
8	0—20	高斯	0.00001	0.02309	0.043	0.853	5.626×10^{-5}
	20—40	高斯	0.00001	0.01532	0.065	0.626	2.187×10^{-4}
	40—100	高斯	0.00050	0.05680	0.880	0.753	5.126×10^{-6}
9	0—20	高斯	0.00010	0.04300	0.233	0.927	1.561×10^{-4}
	20—40	高斯	0.00010	0.03600	0.278	0.832	1.844×10^{-4}
	40—100	高斯	0.00010	0.01172	0.853	0.703	2.510×10^{-5}

对不同时期各层土壤盐分进行空间变异理论模型拟合,模拟结果见表 5,各层土壤其决定系数在 0.662~0.918,可以认为达到显著性水平,残差 0.063~0.225,说明拟合模型有效,其中所有的指标块金值 C_0 都比较小,可以认为它们在研究区范围内的取样间距已经比较合理。各层土壤盐分模拟均符合高斯模型,各层土壤盐分空间相关度在 0.043%~8.374%,均小于 25%,说明具有强烈的空间相关性,土壤盐分变化主要是受结构性因素(土壤母质、地形、土壤类型)的影响,随机因素(耕作、管理措施、种植制度)占总变异很小,自相关引起的空间变异性较强。

2.3 各层土壤盐分(EC 值)时空分布特征

由图 2、图 3、图 4 可知,从空间变化来看,各层土壤盐分的空间分布模式比较一致,盐分含量高的地区均出现在研究区北侧盐荒地,盐分含量低的地区分布在研究区南侧耕地,呈现出条带状和斑块状格局,且各土层盐分分布存在着较强的空间相似性,其原因为研究区北侧为荒地,地势较低,地下水埋深较浅,在长期持续的强烈蒸发作用下,包气带毛细水上升,把深层土壤以及地下水中的可溶性盐类带到土壤表层,致使地表盐分升高,这也是导致荒地次生盐渍化的主要原因。说明盐分是制约当地农业可持续发展的主要因子,而耕地每年有灌溉淋洗,种植小麦、葵花等作物,导致耕地盐分相对偏低。

从时间变化来看,4 月春灌结束,灌溉水把盐分淋洗到土壤深层,导致深层土壤盐分偏大,表层土壤盐分偏小,随着时间的推移,5—6 月气温与地温开始逐渐升高,蒸发作用也越来越强烈,研究区表层土壤盐分开始逐渐增大,而到了 6—7 月,由于荒地杂草丛生,以及耕地向日葵开始生长,导致表层盐分开始下降,而 7 月底由于降雨的影响,表层土壤盐分被淋洗到深层而降低,从而深层土壤盐分增加,8—9 月由于气候干燥,蒸发作用强烈而导致盐分又有所上升,表层盐分增大,因此河套灌区采用秋浇或者春灌来抑制返盐,从而防止土壤次生盐渍化。

2.4 地下水埋深对各层土壤盐分(EC 值)的影响

地下水埋深是水循环过程中的重要变量,它制约着下垫面的水量迁移和转化,影响着蒸散发,同时也是区域盐碱化与荒漠化的重要控制因素,土壤盐分与地下水埋深有着紧密的联系^[10-11],由图 5、图 6 可知,由于灌区蒸发量远远大于降水量,地下水埋深越浅,土壤积盐越严重,地下水埋深较深的区域土壤盐分含量相对较低。研究表明土壤盐分与地下水埋深有较大的影响,试验区北侧荒地由于没有灌溉的影响,通过长期蒸发积累,导致土壤 0—20 cm 盐分含量异常高于其他土层,而耕地通过灌溉淋洗导致土壤盐分比荒地小很多,基本能保证作物正常生长。

表 5 不同时期各层土壤盐分的变异函数理论模型及相关参数

月份	土层深度/cm	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比 /%	决定系数 R^2	残差 RSS
4	0-20	高斯	0.001	1.250	0.080	0.900	0.157
	20-40	高斯	0.001	0.880	0.114	0.876	0.101
	40-100	高斯	0.001	0.923	0.108	0.932	0.063
5	0-20	高斯	0.026	2.101	1.238	0.972	0.114
	20-40	高斯	0.001	1.345	0.074	0.894	0.191
	40-100	高斯	0.001	0.969	0.103	0.933	0.068
6	0-20	高斯	0.001	2.136	0.047	0.981	0.077
	20-40	高斯	0.001	2.011	0.050	0.956	0.118
	40-100	高斯	0.001	1.735	0.058	0.912	0.158
7	0-20	高斯	0.001	0.823	0.122	0.863	0.088
	20-40	高斯	0.029	1.472	1.997	0.718	0.112
	40-100	高斯	0.013	0.971	1.339	0.662	0.152
8	0-20	高斯	0.057	1.544	3.692	0.921	0.106
	20-40	高斯	0.001	1.232	0.081	0.748	0.225
	40-100	高斯	0.001	0.959	0.104	0.897	0.103
9	0-20	高斯	0.001	2.331	0.043	0.980	0.118
	20-40	高斯	0.001	1.590	0.063	0.933	0.138
	40-100	高斯	0.086	1.027	8.374	0.858	0.118

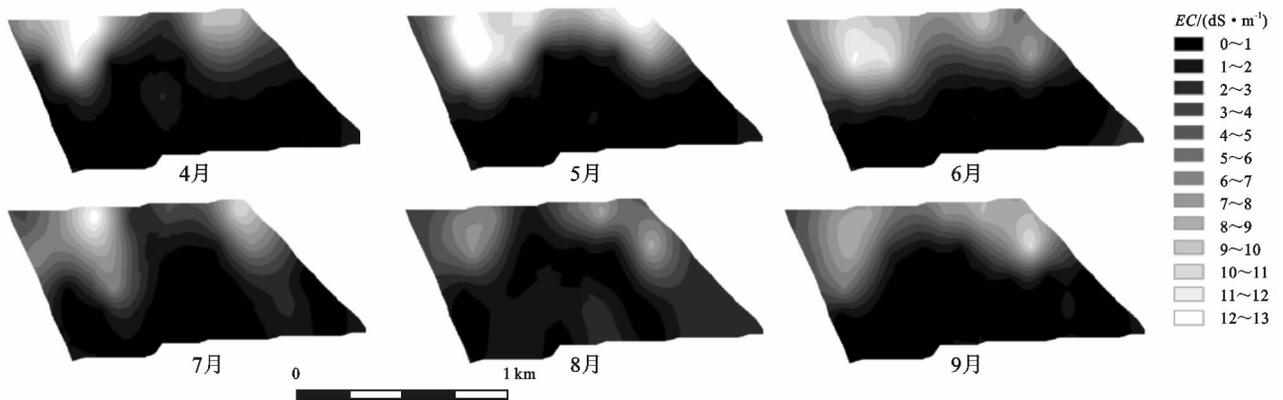


图 2 不同时期 0-20 cm 土壤盐分(EC 值)空间分布

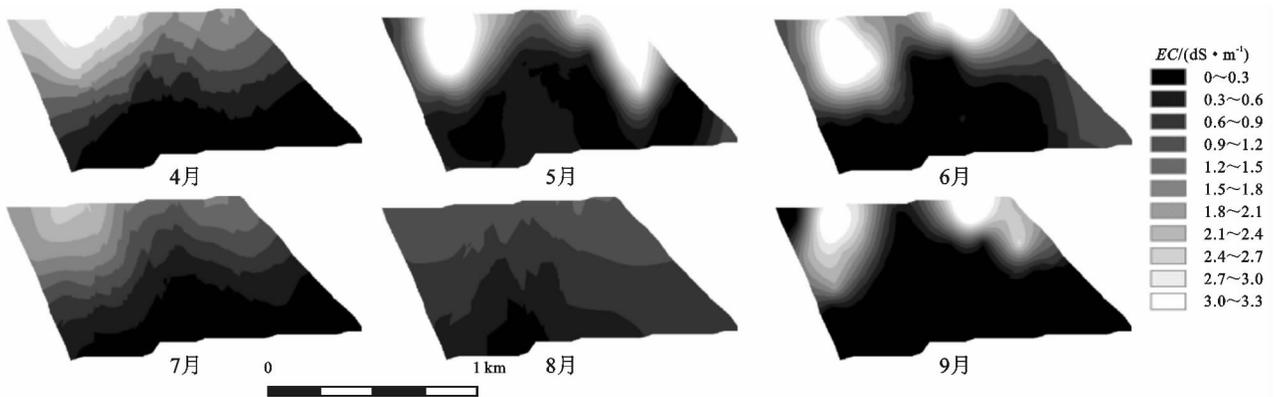


图 3 不同时期 20-40 cm 土壤盐分(EC 值)空间分布

荒地地下水埋深与土壤盐分均满足线性关系,耕地地下水埋深与土壤盐分均满足指数关系, $R^2 > 0.79$,表明相关性均较好,土壤盐分随着地下水埋深减小而增大,荒地 0-20 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较大,20-40,40-100 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较小,耕地地下水埋深在 1~1.6 m 时,土壤

盐分含量随着地下水埋深变化趋势较大,当地下水埋深大于 1.6 m 时,土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较小,且耕地土壤盐分在 0.6 dS/m 以下,对葵花、小麦、玉米生长影响很小,基本不会减产,因此,如何控制地下水位的临界深度,保证作物正常生长,防治因蒸发而导致土壤盐渍化是一个亟需解决的问题。

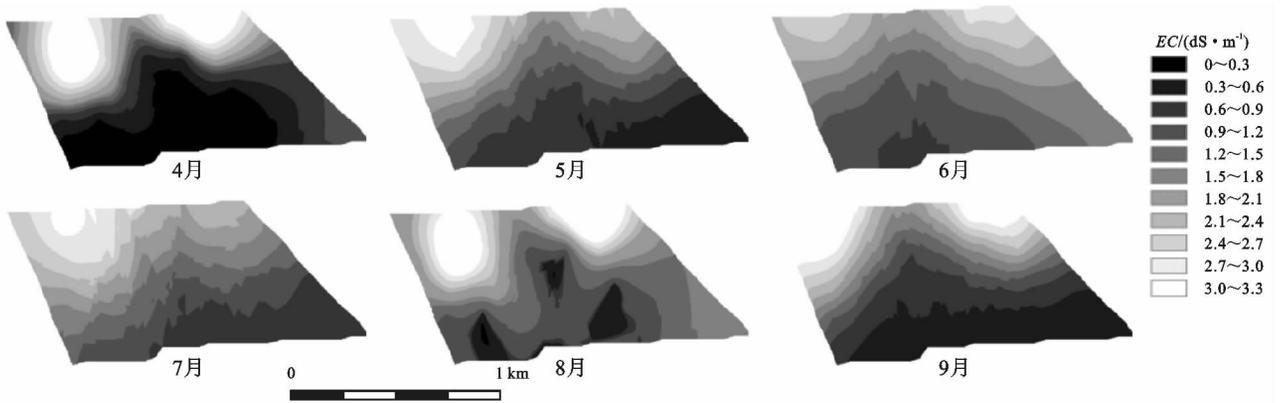


图 4 不同时期 40—100 cm 土壤盐分 (EC 值) 空间分布

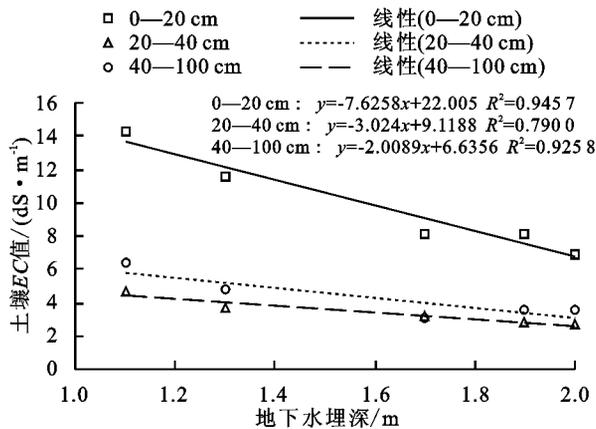


图 5 荒地地下水埋深与土壤盐分的关系

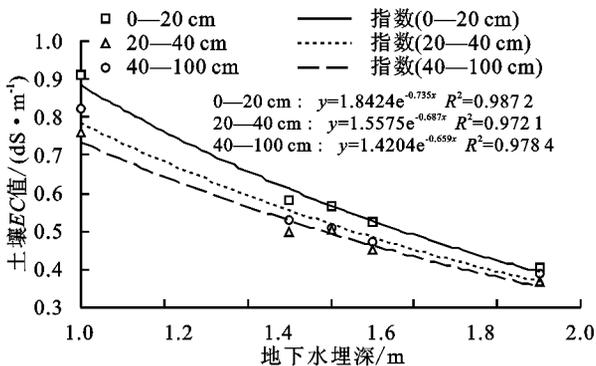


图 6 耕地地下水埋深与土壤盐分的关系

3 讨论

(1)河套灌区由于夏季气温高,降雨少,蒸发强烈,导致深层土壤以及地下水中的可溶性盐类受包气带毛细水上升作用积聚于表层土壤中,从而形成高盐分区,变异性强,这与管孝艳等^[2]的研究结果一致,相反朱金余等^[5]研究天津滨海区天津市开发区绿地土壤的盐分积聚形式不是表聚型,这是因为天津滨海地区地下水位高且降雨多,能把表层盐分淋洗到土壤深层,从而导致深层土壤盐分比表层大。试验区北侧荒地受自然因素影响,南侧耕地受灌溉淋洗,且试验区南高北低,盐分通过深层渗漏或水平运移到荒地土壤中,荒地成为灌区盐分的贮存地,同时荒地盐分也通过对流—弥散作用反侵蚀耕地,盐分形成动态平

衡^[12],荒地 0—40 cm 土层盐分显著高于耕地,土壤盐分表聚现象更明显,耕地由于种植作物增加了地表覆盖度,减少土壤水分蒸发,从而能有效地抑制土壤返盐^[13-14],同时,灌溉使土壤表层的盐分淋洗到土壤深层,也抑制了土壤返盐程度^[15]。本试验区北侧荒地 0—100 cm 土壤盐分高,达到盐荒地的标准,需要采用及时有效的治理盐碱地的方法,从根本上治理盐碱地。

(2)地下水埋深与土壤盐分有密切关系,如何控制地下水埋深来控制土壤盐渍化是一个艰难问题,同时还需要考虑作物、气候、土壤质地、人文因素。因此需要及时掌握地下水埋深与土壤盐分空间变异规律,能防止与治理土壤盐渍化提供重要的理论基础与科学依据^[16];而频繁的农业生产活动、作物类型、灌溉水量和施肥措施差异也是影响土壤盐分和地下水埋深的重要因素^[2],因此需要建设健全的灌溉与排水系统来有效地控制地下水位,从而防治土壤次生盐渍化,但河套灌区地下水含盐量较大,由于强烈的蒸发作用,导致地表聚积盐分,同时灌区农田排水踏沟严重,地下径流不畅,排水效果微乎其微,因此采用暗管排水排盐技术控制地下水位,同时靠排水排盐来改良盐碱地是一个很好的选择^[17]。

4 结论

(1)研究区表层土壤(0—20, 20—40 cm)含水率变异系数除 6 月 0—20 cm(9.779%)在 12.384%~19.667%,属于中等变异性,深层土壤含水率(40—100 cm)变异系数最小,在 3.513%~9.757%,属于弱变异性。表层土壤盐分变异系数在 100.845%~129.279%,属于强变异性,深层土壤变异系数均在 83.685%~98.853%,属于中等变异性。随着土层的增加,土壤含水率与盐分的变异性减弱。

(2)研究区各层土壤含水率和盐分空间变异半方差函数拟合性较好,土壤含水率与盐分均符合高斯模型,

不同时期土壤含水率空间相关度在 0.038%~20.408%,土壤盐分空间相关度在 0.043%~8.374%,均小于 25%,说明具有强烈的空间相关性,可以认为主要是受结构性因素的影响,随机因素占总变异很小,自相关引起的空间变异性较强。通过 Kriging 空间插值分析,可以看出试验区北侧盐分要远大于南侧,试验区北侧荒地不受人类农业生产活动的干扰又由于蒸发强烈从而导致盐分表聚,耕地每年有灌溉淋洗,且试验区南高北低,是这种盐分分布格局形成的重要因素,这也是导致荒地土壤次生盐渍化的主要原因。

(3)在研究区内,荒地地下水埋深与土壤盐分均满足线性关系,耕地地下水埋深与土壤盐分均满足指数关系, $R^2 > 0.79$ 相关性均较好,土壤盐分随着地下水埋深减小而增大,荒地 0—20 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较大,20—40,40—100 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较小,耕地地下水埋深在 1~1.6 m 时,土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较大,当地下水埋深大于 1.6 m 时,土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较小。利用健全的灌排系统能有效地控制地下水位,防治因返盐而造成土壤盐渍化,是防治盐碱地的重要手段。

参考文献:

- [1] 曹明. 基于 ArcGIS 的河套灌区水土资源数据库的开发与应用[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [2] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报,2012,32(4):1202-1210.
- [3] 寇薇. 内蒙古河套灌区土壤水盐空间变异性研究[D]. 兰州:西北师范大学,2008.
- [4] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分空间变异分析[J]. 农业工程学报,2015,31(5):115-120.
- [5] 朱金余,郭世文,杨永利,等. 天津滨海开发区绿地土壤

盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):161-168.

- [6] 刘迁迁,苏里坦,刘广明,等. 伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究[J]. 农业机械学报,2017,48(12):221-228.
- [7] 李彬,史海滨,妥德宝,等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布:以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究,2015,32(4):663-673.
- [8] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 陈丽娟,冯起,成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(11):99-105.
- [10] 阮本清,许凤冉,蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. 水利学报,2008,39(5):573-579.
- [11] 马玉蕾,王德,刘俊民,等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2423-2430.
- [12] 李亮,李美艳,张军军,等. 基于 HYDRUS-2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):66-71.
- [13] 邹晓霞,王维华,王建林,等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. 水土保持学报,2017,31(2):309-316.
- [14] 张冈,周志宇,张彩萍. 利用方式对盐渍化土壤有机质和盐分的影响[J]. 草业学报,2007,16(4):15-20.
- [15] 柯隽迪,黄权中,任东阳,等. 河套灌区节水灌溉对土壤盐分累积规律的模拟研究[J]. 节水灌溉,2016(8):91-94.
- [16] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报,2007,23(8):45-51.
- [17] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.

(上接第 245 页)

- [19] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO₂ photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Botany, 2008, 88(2): 127-133.
- [20] 韩文娇,白林利,李昌晓. 水淹胁迫对狗牙根光合、生长及营养元素含量的影响[J]. 草业学报,2016,25(5):49-59.

- [21] Huang H B, Ouyang W, Wu H T, et al. Long-term diffuse phosphorus pollution dynamics under the combined influence of land use and soil property variations [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579(1): 1894-1903.
- [22] 石艳,杨茜,江韬,等. 三峡水库消落带典型土壤中磷的形态转化特征[J]. 水土保持学报,2014,28(6):325-331.