

灌区土壤盐分空间变异及多因素响应关系

谷晓伟, 韩金旭, 张凤燃, 张丹, 刘姝芳

(黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 研究土壤含盐量空间特征和分布格局, 分析土壤盐分空间格局与地下水、土壤物理特性参数间的空间响应关系, 为灌区盐渍化防控提供理论依据。[方法] 以黄河南岸灌区吉格斯太灌域为例, 网格化布点, 分层采样测定土壤含盐量、表层土壤含水量、颗粒组成、干容重并换算热容量及导热率, 同步监测地下水埋深及含盐量, 采用经典统计方法和地统计方法分析土壤含盐量空间分布特征及其与物理特性和地下水等因素间的空间相关性。[结果] 灌域处于非盐化—轻度盐化状态, 土壤含盐量呈中等空间变异程度, 总体呈现相对独立的随机分布, 空间结构特征可以用高斯模型和指数模型描述。土壤含盐量与地下水埋深呈显著负相关, 与地下水含盐量呈显著正相关, 地下水埋深 <1.6 m 区域发生轻度盐渍化风险较高。0—20 cm 土壤含盐量与黏粒含量、容重、含水量、导热率及热容量显著空间正相关, 相关范围约 2~6 km; 与砂粒含量呈显著空间负相关, 相关范围约 2~4 km。20—60 cm 土壤盐分与 0—20 cm 土壤黏粒、砂粒含量、导热率、热容量及含水量呈显著相关, 相关范围与土壤表层略有差异。[结论] 黏粒含量较高, 含水率较大, 地下水埋深 <1.6 m 的区域是灌域盐渍化防控的重点区域。

关键词: 土壤盐分; 空间变异; 地下水; 物理特性; 空间响应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0100-07

中图分类号: S152.8

文献参数: 谷晓伟, 韩金旭, 张凤燃, 等. 灌区土壤盐分空间变异及多因素响应关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 100-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.014; Gu Xiaowei, Han Jinxu, Zhang Fengran, et al. Spatial variability of soil salinity and its multi factor response in irrigation area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 100-106.

Spatial Variability of Soil Salinity and Its Multi Factor Response in Irrigation Area

Gu Xiaowei, Han Jinxu, Zhang Fengran, Zhang Dan, Liu Shufang

(Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: [Objective] The spatial characteristics and distribution pattern of soil salt in irrigation area was studied, in order to analyze the relationship between the spatial pattern of soil salt and groundwater, soil physical parameters. [Methods] Jigesitai sub-district in the south bank irrigation area of the Yellow River was taken as an example. The soil samples in 0—20 cm, 20—40 cm and 40—60 cm layers were collected. The soil salt content, soil volume water content at 0—20 cm layer, particle composition, dry bulk density were measured, soil heat capacity and thermal conductivity were converted, and groundwater depth and salt content were monitored simultaneously. The spatial distribution characteristics of salt content and its spatial correlation were analyzed by classical statistical method and geostatistical method. [Results] The irrigation area was in the state of non-mild salinization. The soil salt showed a middle degree spatial variation and relatively independent random distribution. Spatial structure characteristics were fitted by Gaussian and exponential model. Soil salt was negatively correlated with groundwater depth, and positively correlated with groundwater salt content. The area with groundwater depth less than 1.6 m had a higher probability of

收稿日期: 2019-12-31

修回日期: 2020-03-04

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原区降雨径流挖潜与高效利用研究示范”(2017YFC0403604); 国家重点研发计划项目课题“京津冀多水源多目标协同配置与安全保障方案”(2016YFC0401407); 中央科研院所基本科研业务费专项“鄂尔多斯水权转换对土壤盐分运移规律影响”(HKY-JBYW-2017-13)

第一作者: 谷晓伟(1981—), 女(汉族), 山东省威海市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水资源管理方面的研究工作。Email: longway001@163.com.

通讯作者: 韩金旭(1984—), 男(汉族), 天津市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业水土工程、水资源利用方面的研究工作。Email: hanjinxu1984@126.com.

slightly salinization. The soil salt at 0—20 cm layer was positively correlated with clay content, soil bulk density, moisture content, thermal conductivity and heat capacity in spatial range of 2~6 km, and negatively correlated with sand content in spatial range of 2~4 km. The soil salt at 20—60 cm layer was significantly related to clay content, sand content, thermal conductivity, heat capacity and water content of 0—20 cm soil layer, and the correlation range was slightly different from that of the soil surface. [Conclusion] The area with high clay content, high water content and groundwater depth less than 1.6 m is the key area of soil salinization control in the irrigation area.

Keywords: soil salt; spatial variation; ground water; physical characteristics; spatial response relationship

土壤盐碱化是灌溉农业的伴生问题,据 FAO 统计全球约 1/3 的灌溉土地因盐碱化而生产力降低。中国盐渍化土壤面积约 $3.60 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地的 4.88%, 其中耕地盐渍化面积 $9.21 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积 6.62%^[1]。土壤受母质、地形等自然及人为因素共同作用,具有高度空间异质性^[2]。了解土壤空间特性是盐渍化防治的重要前提。刘鑫等^[3]基于 ArcGIS 对河套灌区土壤盐碱化指标进行了等级划分;徐英等^[4]研究发现地下水对地表返盐的影响具有滞后性,河套灌区 4 月底地表发生中、轻度盐渍化的地下水临界埋深分别为 2.0 m, 2.5 m。王卓然^[5]、吴亚坤^[6]、徐存东^[7]等基于多源数据,分析了不同区域土壤盐分空间变异特征。从目前成果来看,土壤盐分空间变异研究较多关注盐分单一要素的空间异质性分析,对多参数空间协同关系研究尚待进一步加深。黄河南岸灌区是鄂尔多斯节水改造的重点区域,也是受盐渍化影响的典型灌溉绿洲灌区。本文以吉格斯太灌域为例,根据实测数据,利用地统计学方法解析灌域土壤盐分空间分布特征,研究土壤盐分空间格局与地下水、土壤物理特性之间空间响应关系,成果可为灌区土壤盐渍化防控提供理论依据。

1 试验设计、材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于鄂尔多斯市北部黄河南岸灌区吉格斯太灌域 ($110^{\circ}33'29''$ — $110^{\circ}42'30''\text{E}$, $40^{\circ}18'25''$ — $40^{\circ}19'8''\text{N}$) 扬黄节水改造区,面积约 $2\,500 \text{ hm}^2$ 。灌域东以呼斯太河为界,西以东柳沟为界,北至黄河,南至毛乌素沙漠,为井渠结合灌域,总灌溉面积 $6\,800 \text{ hm}^2$ 。区域多年平均气温 $6.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均无霜期 160 d, 平均日照时数 3 159 h, 平均降水量 311 mm, 平均蒸发量 $2\,115 \text{ mm}$ 。

1.2 样点布设及样品采集

样品采集于 2016 年 5 月中旬进行,试验区按照网格化结合土地利用类型布置采样点 29 个,地下水观测井 11 眼(如图 1 所示)。按照 0—20 cm(以下称表层)、20—40 cm 和 40—60 cm 3 个深度人工取土,

采用环刀法测定土壤干容重及含水量,同步观测地下水埋深和含盐量。风干土样过 2 mm 筛,表层土壤测定颗粒组成,其余按 5:1 配置土壤溶液测定电导率,并换算含盐量。

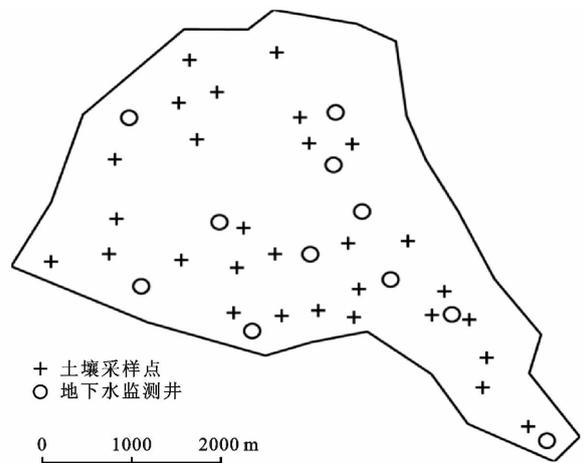


图 1 研究区样点分布

根据监测情况,试验区地下水埋深在 1.13~3.27 m, 含盐量为 1.12~2.86 g/L, 地下水埋深自西北向东南逐渐加大,含盐量逐渐降低。试验区表层土壤容重 $1.40 \sim 1.79 \text{ g/cm}^3$, 砂粒含量占比 86.58%~96.68%, 粉粒含量占比 2.65%~13.17%, 黏粒占比 0.16%~3.03%。按照国际土壤质地分类标准,29 个采样点全部为砂土(表 1)。

表 1 表层(0—20 cm)土壤物理特性参数统计表

灌域	指标	最大值	最小值	平均值	土壤质地
吉格斯太	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.79	1.40	1.58	砂土
	黏粒含量/%	3.03	0.16	0.98	
	粉粒含量/%	13.17	2.65	8.42	
	砂粒含量/%	96.68	86.58	90.6	

注:黏粒 $<0.002 \text{ mm}$,粉粒 $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$,砂粒 $0.02 \sim 2 \text{ mm}$ 。

1.3 数据分析方法

本次采用地统计学方法分析土壤含盐量空间分布特征,采用互相关函数法研究土壤盐分与地下水及

表层土壤物理特性间的空间响应关系。其中,土壤物理特性参数选择黏粒、粉粒、砂粒含量、干容重、体积含水量、导热率与热容量等指标,热容量、导热率采用相关文献^[8-9]推荐公式计算。地下水参数包括埋深和含盐量。主要统计分析方法如下:

(1) 经典统计学方法。

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

式中: C_v 为变异系数,当 $C_v \leq 0.1$ 时变量表现为弱变异, $0.1 < C_v < 1$ 时为中等变异,当 $C_v > 1$ 时为强变异。 S 为标准差; \bar{x} 为变量均值。

(2) 地统计学方法。

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

式中: $\gamma(h)$ 为空间变量半方差函数值,用以表示变量空间变异结构; h 为两样本点空间距离; $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$ 分别为变量在点 x_i 和 x_i+h 处观测值; $N(h)$ 表示滞后距离为 h 时的样本对数。本文中半方差函数主要采用如下模型:

$$\text{高斯模型: } \gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)^2] \quad (3)$$

$$\text{指数模型: } \gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h/a}) \quad (4)$$

式中: C_0 为块金值; a 为变程(km); C 为拱高; C_0+C 为基台值。

区域化变量空间变异由结构性因素和随机性因素共同引起,气候、地形、母质等结构性因素使变量具有空间连续性,耕作、灌溉等随机因素则会弱化其连续性^[4]。一般用块基比 $[C_0/(C_0+C)]$ 表示随机变异占总变异的大小,块基比 $0 \sim 25\%$ 属较强空间相关性, $25\% \sim 75\%$ 属中等空间相关性, $75\% \sim 100\%$ 为弱空间相关性。

(3) 空间自相关性。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} [Z(x_i) - \bar{Z}][Z(x_j) - \bar{Z}]}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (5)$$

$$s^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

式中: I 为 Moran's I 指数,用于度量变量空间自相关程度。 $I > 0$ 表示变量呈空间正相关, $I < 0$ 变量呈空间负相关性, $I = 0$ 则呈空间随机性分布; ω_{ij} 为区域 i 与 j 间的空间权重,相邻为 1,不相邻为 0; $Z(x_i)$, $Z(x_j)$ 为变量 x 在 i 与 j 处的值; \bar{Z} 为变量均值; S^2 为方差。统计检验需将 I 转换为标准正态分布,计算公式为:

$$Z(I) = [1 - E(I)] / \sqrt{\text{var}(i)} \quad (7)$$

式中: $Z(I)$ 表示 I 的标准正态分布值,当 $Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$ ($\alpha = 0.05$) 时,表明变量在空间上具有显著自相关性; Z 位于 $[-1.96, 1.96]$ 则观测值呈独立随机分布; $E(I)$ 为理论上的数学期望; $\text{var}(i)$ 为方差。

(4) 互相关函数法。

互相关函数可以较好地表达两变量间空间关系^[9-12],计算公式为:

$$d(h) = \frac{1}{S_1 S_2 [N(h) - 1]} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x_i) - \bar{Z}_1][Z_2(x_i) - \bar{Z}_2] \quad (8)$$

式中: $d(h)$ 为互相关函数值; $Z_1(x_i)$, $Z_2(x_i)$ 为采样点 x 处区域化变量 Z_1 , Z_2 的实测值; \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 为 Z_1 , Z_2 的均值; S_1 , S_2 为 Z_1 , Z_2 的标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分统计特征

计算土壤盐分统计参数如表 2 所示。参考相关成果^[3-4,13],含盐量 < 2 g/kg 为非盐化土; $2 \sim 4$ g/kg 为轻度盐化土; $4 \sim 6$ g/kg 为中度盐化土; $6 \sim 10$ g/kg 为重度盐化土。由表 2 可知,各土层平均含盐量 $1.96 \sim 2.46$ g/kg,属非—轻度盐化土。表层土壤平均含盐量最高,变幅最大,极差达到 8.29 g/kg。各层含盐量 C_v 值为 $0.52 \sim 0.61$,属中等变异强度。

表 2 土壤含盐量统计特征

指标	土层深度/cm	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度	峰度	C_v	K-S 检验
含盐量/ (g · kg ⁻¹)	0—20	9.46	1.17	2.46	1.51	2.97	10.36	0.61	0.251
	20—40	7.34	1.04	2.05	1.24	2.52	7.48	0.61	0.250
	40—60	6.30	1.07	1.96	1.02	2.23	6.00	0.52	0.199

2.2 土壤盐分空间分布与变异特征

2.2.1 土壤盐分空间变异性 根据表 2 偏度、峰度及 K-S 检验结果,土壤含盐量近似服从对数正态分布,满足地统计分析要求,利用 GS⁺ 9.0 对土壤含盐量进行半方差分析,采用 GeoDa 1.14 计算 Moran's I 指数^[14-15],结果详见表 3。

根据分析结果,土壤含盐量可采用高斯模型和指

数模型较好拟合, R^2 在 $0.74 \sim 0.82$ 。根据表 3 各土层含盐量块基比在 $25\% \sim 75\%$,结合公式(2)—(4)可知土壤含盐量空间分布受到的人为、自然因素的共同作用,属于中等空间变异程度。不同土层 Moran's I 值为 $-0.088 \sim 0.044$, Z 得分为 $-0.488 \sim 0.744$,位于 $[-1.96, 1.96]$,土壤盐分在空间上呈相对独立的随机分布。

表 3 土壤盐分地统计分析结果

土层/cm	模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/km	R^2	块基比/ $\%$ [$C_0/(C_0+C)$]	Moran's I	Z
10—20	Gaussian	0.114 5	0.341 0	9.85	0.74	33.6	-0.088	-0.488
20—40	Exponential	0.126 7	0.256 2	8.37	0.69	49.8	-0.004	0.325
40—60	Gaussian	0.118 8	0.264 6	4.88	0.82	44.9	0.044	0.744

2.2.2 土壤盐分空间分布特征 利用 Surfer 12.0 基于 Kriging 插值计算土壤含盐量空间分布如图 2 所示。

由图 2 可知,土壤含盐量呈斑块变化,总体自西北向东南逐渐减小。除中东部存在非盐渍化区域外,其余均达到或超过轻度盐化阈值,西北局部达到重度

盐化程度。随土层加深,盐分峰值总体有所降低,东南部非盐化土范围不断扩大,西部重度盐化土面积减小。按表层土壤划分,试验区非盐渍化面积(<2 g/kg)占 25.6%,轻度盐渍化面积($2\sim 4$ g/kg)占 64.4%,中重度以上盐渍化面积占 10% (>4 g/kg),总体处于非一轻度盐渍化状态。

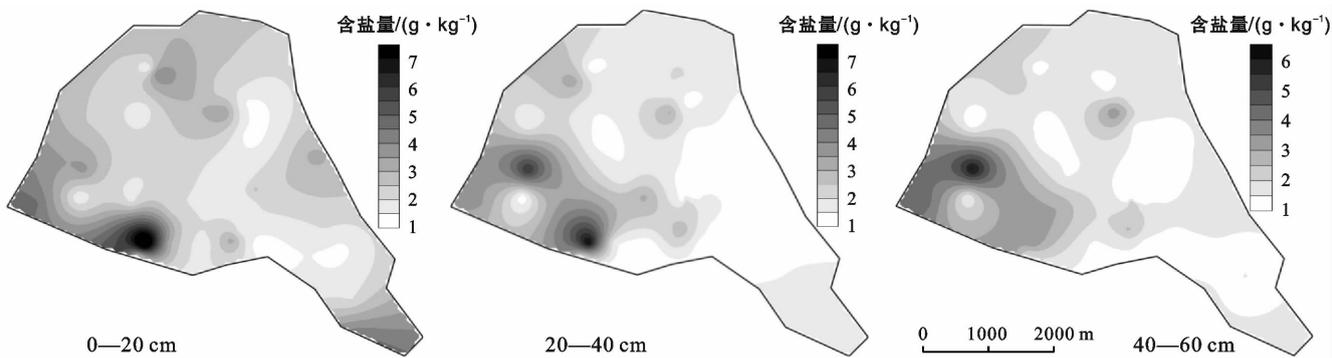


图 2 灌域土壤盐分空间分布情况

2.3 土壤含盐量多因素响应关系

2.3.1 土壤含盐量多因素相关性分析 根据半方差分析结果,试验区土壤盐分受结构性和随机性因素共同作用。地下水是耕层土壤的下边界,表层土壤物理特性除影响本层外,也作为上边界影响下层土壤,两者均可视为影响土壤盐分的结构性因素。为便于分析,将土壤划分为表层(0—20 cm)和中下层(20—60 cm),中下层土壤含盐量采用 20 cm 以下含盐量均

值。表层土壤物理特性及地下水参数与含盐量相关性分析结果如表 4 所示。由于地下水井与采样点无法一一对应,本次地下水数据采用空间差值结果。由表 4 可知,表层土壤含盐量与其自身物理特性之间相关性不显著,中下层土壤含盐量与表层土壤含水量显著正相关。地下水对土壤含盐量影响明显,土壤含盐量与地下水埋深显著负相关,与地下水含盐量显著正相关。

表 4 不同土层土壤含盐量与地下水、表层土壤物理特性相关性

土层/cm	表层物理特性参数				表层水热特性参数			地下水参数	
	容重	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	含水量	导热率	热容量	埋深	含盐量
表层(0—20)	0.197	-0.102	0.054	0.239	0.143	0.210	0.200	-0.397*	0.406*
中下层(20—60)	0.057	-0.111	0.036	0.286	0.380*	0.287	0.279	-0.402*	0.411*

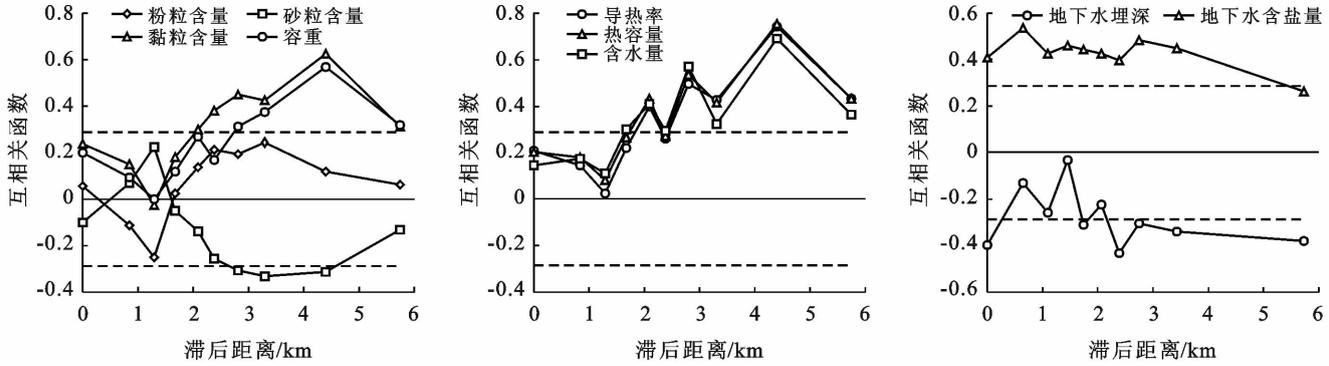
注: * 表示在 $p>95\%$ 水平上相关性显著;地下水埋深及含盐量数据为空间差值计算结果。

2.3.2 土壤含盐量多因素空间相关性分析 双因子相关性分析(表 4)表明土壤含盐量受地下水影响显著,但除含水量外,土壤含盐量与表层土壤物理特性无显著相关性。作为空间连续体,土壤盐分与其相关因素之间还可能存在空间依赖性。采用互相关函数^[9-11]分析土壤含盐量与地下水、表层土壤物理特性

间的空间相关性如图 3—4 所示。表层土壤含盐量与地下水及其自身物理参数空间相关性分析结果如图 3 所示。由图 3 可知,表层土壤盐分与其自身黏粒含量、容重、水热参数在 2~6 km 范围内显著正相关,与砂粒含量在 2~4 km 范围内显著负相关,表明在相关范围内土壤含盐量随黏粒含量、容重、含水量、热容量

及导热率的增加而增大,随砂粒含量增加而减小。表层土壤盐分与地下水含盐量显著正相关,与地下水埋深显著负相关,地下水对土壤盐分影响较大。

对比表 4 和图 3 可知,土壤盐分与物理特性和地下水之间存在空间响应关系,物理特性对盐分的影响具有空间滞后性。



注:图中虚线为 95%置信线,相关函数值超过置信线即为相关性达到显著。下同。

图 3 表层土壤含盐量与地下水、表层土壤物理参数空间相关性

由图 4 可见,中下层土壤盐分与地下水及表层土壤物理特性存在较显著的空间相关关系。其中,中下层土壤盐分与地下水参数、表层土壤黏粒、砂粒含量、热容量及导热率的空间相关范围和属性均与表层土

壤基本相当,与表层土壤含水量正相关范围扩大至 0~6 km,容重和粉粒含量则未达显著级别。由此可见,表层土壤物理性质与其下层土壤盐分存在空间协同性,表现出一定的依赖关系。

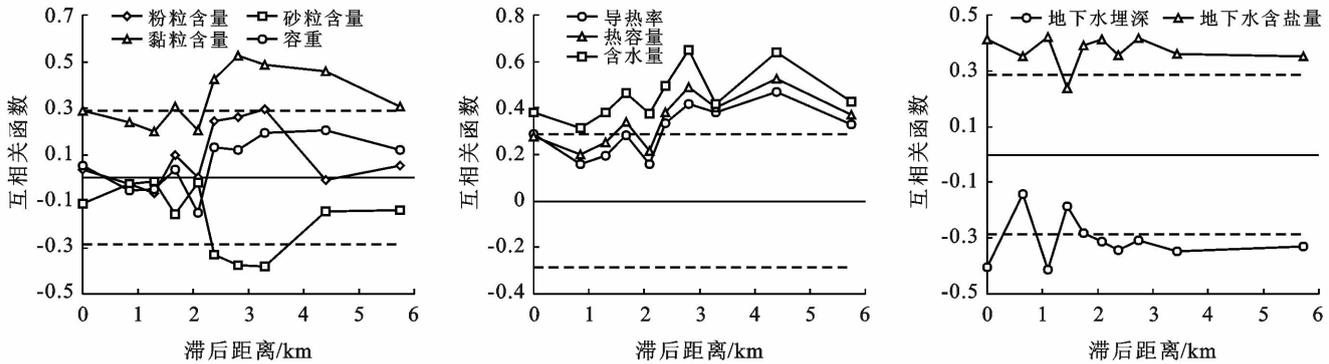


图 4 中下层土壤含盐量与地下水、表层土壤物理参数空间相关性

2.3.3 土壤含盐量与土壤物理特性及地下水空间分布关系 绘制地下水埋深、表层土壤物理特性及不同土层盐渍化风险空间分布如图 5 所示。由图 5 可见,土壤砂粒含量、容重及水热特性呈较一致的斑块分布。在试验区西北一北、西南和东南部表层土壤各物理特性存在明显的极值斑块,其中北部轻度盐渍化高风险区与土壤物理参数空间分布一致性较明显,但在东南部上述因素与盐渍化风险分布一致性减弱,这可能与东南部地下水埋深明显加大有关。总体而言,从斑块分布来看土壤物理参数和含盐量具有较明显的响应。研究区地下水埋深 h 由北向南逐渐加大,北、西北部受黄河侧向补给 $h < 1.6$ m,南部 h 逐渐加大至 3 m 以上。地下水含盐量呈与埋深相类似的带状

分布,自西北向东南逐渐降低。结合土壤盐渍化概率分布,地下水埋深较浅(< 1.6 m)、含盐量较高(> 2.4 g/L)的灌域西、北部轻度盐渍化风险较高,地下水与土壤盐分间存在较明显的空间响应关系,与前述分析结果一致。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤盐分变化受到立地属性、耕作条件等自然和人为因素的共同影响。在中等尺度上研究土壤盐分空间变化,分析其与土壤物理组成、水热效应和地下水间的关系,有助于在较大尺度范围内认识盐渍化发生的空间规律,为区域控盐提供科学依据。

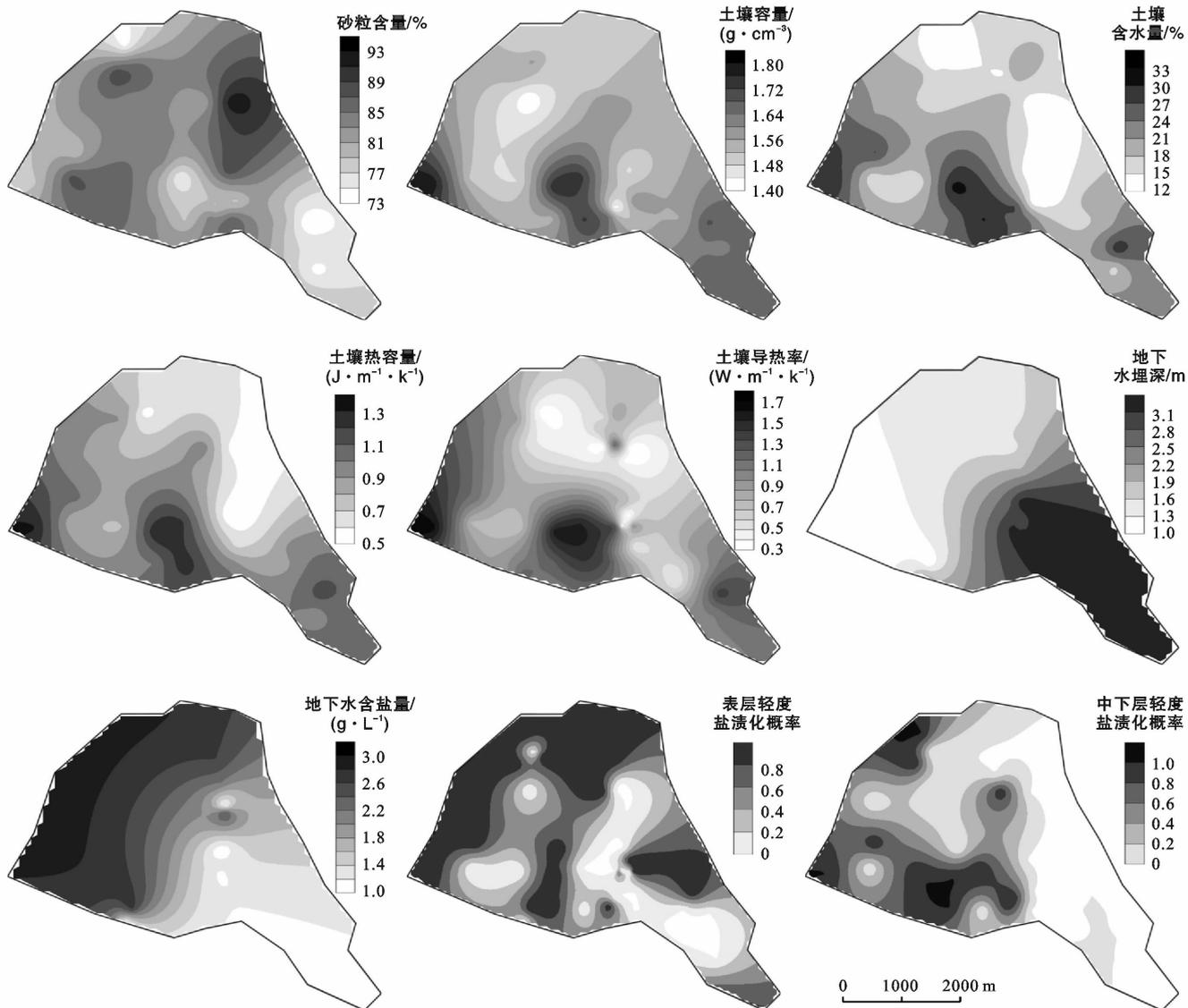


图 5 表层土壤物理特性、地下水埋深及轻度盐渍化风险空间分布

(1) 土壤特性的空间属性可以采用地统计学方法描述。王全九等^[9,14,16-17]在不同地区开展的研究均发现土壤含盐量在一定范围内具有空间结构特征,半方差函数可以用高斯模型和指数模型拟合,与本次研究结论基本一致。结合前人成果可见,不同区域变量空间自相关性存在差异,王维维^[14]等发现焉耆盆耕作层土壤盐分 Moran's I 接近于 0,即呈相对独立的随机分布,与本次研究结论一致;张飞^[15]等则发现精河绿洲 0—20 cm 土壤电导率表现出较强的空间正相关性。

(2) 潜水蒸发是耕作层土壤盐分的主要来源。根据河套灌区开展的相关研究,窦旭等^[2]认为埋深大于 1.6 m 时土壤含盐量随埋深增加变幅逐渐减小;徐英^[4]等研究发现灌区 4 月底发生盐渍化的临界地下水埋深为 2.0~2.5 m。本研究表明,地下水参数与土

壤含盐量存在显著的相关关系,地下水埋深 < 1.6 m 的区域发生轻度以上盐渍化概率较高,与前述相关研究结论基本一致。

(3) 土壤物理性质与盐分关系尚无统一认识。吕廷波^[18]、毛海涛^[19]发现细颗粒含量与土壤最终积盐量成正比;刘继龙^[16]认为 0—20 cm 土壤电导率与基本物理特性相关性不显著,但 20—40 cm 土层两者显著相关。本次通过相关性分析(表 4)认为,地下水与土壤盐分显著相关,与土壤物理特性相关性不显著。但相关性分析只能代表各因素在样本点上的关系,对空间响应关系无法表达,本次采用互相关函数分析发现土壤盐分与土壤物理特性和地下水等多因素之间存在空间相关性,更能体现区域变量在空间上的协同性。目前对土壤盐分与其他因素空间相关性研究尚不多,王全九^[9]研究粉壤土灌区得出土壤盐分

空间分布与含水量、热容量及导热率等水热条件的空间关系不显著,与本次研究结论不一致,这一差异是否与土壤质地条件相关尚需开展进一步的比较研究。本次研究发现表层土壤物理特性对中下层土壤盐分空间分布存在影响,这一影响在纵向上可以理解为表层土壤作为上边界条件对下层土壤的作用,樊会敏^[20]在研究中也发现土壤物理性质和盐分在上下层之间存在异位影响,但没有从空间分布角度对异位影响进行探讨。

3.2 结论

(1) 试验区土壤含盐量自西北向东南逐渐减小,灌域处于非盐化—轻度盐化状态。土壤含盐量在一定范围内具有空间结构特征,可以用高斯模型和指数模型拟合;土壤含盐量空间分布受到人为、自然因素的共同作用,属中等空间变异程度,总体呈现相对独立的随机分布。

(2) 表层土壤(0—20 cm)含盐量与其自身物理特性存在空间响应。表层土壤含盐量与黏粒含量、土壤容重、含水量、导热率及热容量在 2~6 km 范围内显著正相关;与砂粒含量在 2~4 km 范围内显著负相关。

(3) 表层土壤物理特性与中下层土壤(20—60 cm)盐分存在空间相关关系。中下层土壤含盐量与表层土壤黏粒含量、导热率及热容量在 2~6 km 范围内显著正相关;与砂粒含量在 2~4 km 范围内显著负相关;与表层土壤含水量在 0~6 km 范围内显著正相关。

(4) 土壤含盐量与地下水埋深显著负相关,与地下水含盐量显著正相关,地下水埋深<1.6 m、含盐量>2.4 g/L 的区域发生轻度盐渍化的风险较高。

综合以上,对土壤盐分及其影响因素的空间相关性分析结果表明,试验区土壤盐分存在空间结构特征,表层土壤含盐量与土壤物理、水热及地下水参数存在空间相关性,地下水埋深较浅(<1.6 m)、黏粒含量和含水率较高的区域是土壤盐渍化防治的重点区域。

[参 考 文 献]

[1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.

[2] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 246-253.

[3] 刘鑫, 魏占民, 王长生, 等. 基于 ArcGIS 的河套灌区土壤盐碱化空间分析[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 88-91.

[4] 徐英, 葛洲, 王娟, 等. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化

与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 123-130.

- [5] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1040-1049.
- [6] 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.
- [7] 徐存东, 王荣荣, 程慧, 等. 基于遥感数据分析干旱区人工绿洲灌区的水盐时空分异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 80-89.
- [8] 苏李君, 王全九, 王铄, 等. 基于土壤物理基本参数的土壤导热率模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 127-133.
- [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.
- [10] 徐英, 周明耀, 薛亚锋. 水稻叶面积指数和产量的空间变异性及关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 10-14.
- [11] Davidoff, M S H. Correlation between spatially variable soil moisture content and soil temperature [J]. Soil Science, 1988, 145(1): 1-10.
- [12] Wang H, Hall C A S, Cornell J D et al. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico [J]. Landscape Ecology, 2002, 17(8): 671-684.
- [13] 杨树青, 史海滨, 李瑞平. 盐渍化土壤水热盐迁移与节水灌溉理论研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [14] 王维维, 麦提吐尔逊·艾则孜, 艾提业古丽·热西提, 等. 焉耆盆地农田耕层土壤盐分的空间变异及分布格局[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 195-201.
- [15] 张飞, 李怡博, 王东芳, 等. 精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 64-73.
- [16] 刘继龙, 刘璐, 马孝义, 等. 不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 305-312.
- [17] 陈星星, 张江辉, 才仁加甫, 等. 南疆干旱地区土壤盐分空间变异特征研究: 以库尔勒三十一团为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 108-114.
- [18] 吕廷波, 何新林, 辛明亮, 等. 玛纳斯河流域不同土壤质地土壤含盐量分析[J]. 节水灌溉, 2014(5): 4-6.
- [19] 毛海涛, 黄庆豪, 吴恒滨. 干旱区农田不同类型土壤盐碱化发生规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 112-117.
- [20] 樊会敏, 许明祥, 李彬彬, 等. 渭北地区农田土壤物理性质对土壤剖面盐分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 198-204.