

孔雀河流域农业灌区土壤盐分空间分布及变异特征^①

张 雪¹, 陈耀轩¹, 张 盼², 杨峰田^{1*}

(1 吉林大学环境与资源学院, 水资源与环境研究所, 长春 130021; 2 吉林省煤田地质勘察设计院, 长春 130062)

摘 要:为查明孔雀河流域的土壤盐分空间分布及变异特征,进而为地区盐渍化土壤改良与利用提供科学依据。在该区 25 个点逐层采集土壤剖面样品,测试土壤盐分含量,利用地统计学基本原理与手段,获得区内土壤盐渍化的空间变异信息参数,绘制了区域土壤盐分含量空间分布图。研究表明:0~20 cm 和 20~60 cm 属中度盐渍土,60~100 cm 属轻度盐渍土;各土层盐分含量处于强变异性范围;块基值<25%,具有强空间相关性,结构性因素对其空间变异的贡献较大;土壤盐分含量存在明显的空间分布规律,水平方向上由上游至下游含盐量先增后减,随距河流距离增加含盐量缓慢增大,垂直方向随深度增加含盐量逐渐减小。

关键词:孔雀河流域;地统计学;土壤盐分;空间变异

中图分类号:S151.9

孔雀河流域是巴州经济社会高速发展的核心地带,主要农作物为香梨和棉花,土地资源起着非常重要的作用。由于地处西北干旱地区,土壤盐渍化现象严重,是研究区主要的土地退化形式之一,不但造成资源的破坏、农业生产的巨大损失,而且对生物圈和生态环境构成威胁^[1]。

国内外大量研究表明,土壤中盐分积累过程是受气候、成土母质、地形地貌、水资源等自然因素和人为因素相互叠加作用的结果^[2],具有复杂性和高度的时空变异性^[3]。土壤盐分的空间变异状态在一定程度上反映了土壤耕作层内的土壤盐渍化程度和状态^[4],对区域土壤盐分空间变异性的正确理解是科学管理利用土壤资源的基础^[5]。因此研究土壤盐分的空间变异性是防治土壤盐渍化发生发展和盐渍地科学管理的前提^[6]。

地统计学方法是以区域化变量为核心和理论基础,以地质变量的空间结构(空间相关)和变异函数为基本工具的一种数学地质方法^[7]。20 世纪 70 年代地统计学引入到土壤学科中来^[8]。现今,它已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一^[9]。不仅能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特性,而且可以将空间格局与生态过程联系起来,有效地解释空间格局对生态过程

与功能的影响^[10]。

我国开展盐渍土研究已经有 70 年的历史^[11],对我国盐渍土的类型分布,盐渍化发生、演化的机理与趋势都有了比较系统的认识^[12]。近年来,关于孔雀河的研究主要集中在流域土地利用和水质变化等方面,2010 年尹业彪等^[13]研究了沿孔雀河流向的土壤盐分空间变异问题。本次研究利用地统计学与 Kriging 插值相结合的方法对孔雀河流域的土壤盐分空间分布及变异特征进行分析,进而为地区盐渍化土壤改良与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆塔里木盆地北缘孔雀河流域中上游,85°45′~86°18′E、41°30′~41°52′N 的农业灌溉区域,面积约 1 206 km²。该区属暖温带大陆性荒漠气候,多年平均气温 11.3℃,夏季炎热,冬季寒冷,干旱少雨,蒸发强烈,多年平均降水量 61.26 mm、平均蒸发量 2 772.8 mm。地势总体上呈东北高、西南低的趋势,地形平坦开阔,坡降 5‰~30‰,海拔高层 890~960 m。山前带松散岩类孔隙水 TDS(总溶解固体,本次研究不包含有机物)含量一般为 0.5~1.0 g/L,由东北向西南,受溶滤作用影响,调查区

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41202167)资助。

* 通讯作者(yangfengtian@jlu.edu.cn)

作者简介:张雪(1992—),女,吉林梅河口人,硕士研究生,主要研究方向为地下水科学与工程。E-mail: zhangxue566@163.com

中部地区地下水 TDS 含量大于 3 g/L, 沿地下水流向, 潜水埋深变浅, 蒸发作用变强, 在调查区西南端形成地下水 TDS 含量大于 10 g/L 的高矿化度咸水区。岩性结构复杂, 由山前向倾斜平原, 由单一结构的卵砾石、砂砾石过渡为亚黏土、亚砂土和砂层、砂砾石互层的多层结构。土地利用类型包括香梨地、棉花地、林地、裸地、农村宅基地以及城镇住宅用地, 其中大部分区域为农业种植区, 作物类型主要为棉花和香梨。近年来, 随着社会经济快速发展, 农业规模迅速扩大, 新增农田多为对裸地等含盐量较高的土地进行灌溉洗盐改善而来。区内唯一的地表水源为孔雀河, 河水由各类渠系从调查区北部引向各灌溉区, 存在季节性缺水, 缺水主要集中在作物生长季, 因此农业灌溉需开采地下水。灌溉方式以大水漫灌为主。

1.2 土壤样品采集与处理

本研究采用 GPS 定位技术, 以孔雀河流域 1:50 000 地形图为基础, 综合考虑岩性、灌溉水源、灌溉方式、作物类型等因素, 取样时兼顾代表性和均匀性, 共钻取 25 个采样孔, 每个采样孔按 0~20、20~60、60~100 cm 土层深度利用土壤样品取样器进行分层采样, 共采集 75 个土壤样品, 将其放入自封袋中密

封保存。采样点分布图见图 1。采样日期为 2014 年 7—8 月, 各采样点坐标利用 GPS 进行定位。对所采集的土壤样品进行风干研磨, 过 1 mm 筛, 以水土比 5:1 进行抽滤浸提, 按常规方法进行土壤盐分含量的测定^[14]。测试结果见表 1。

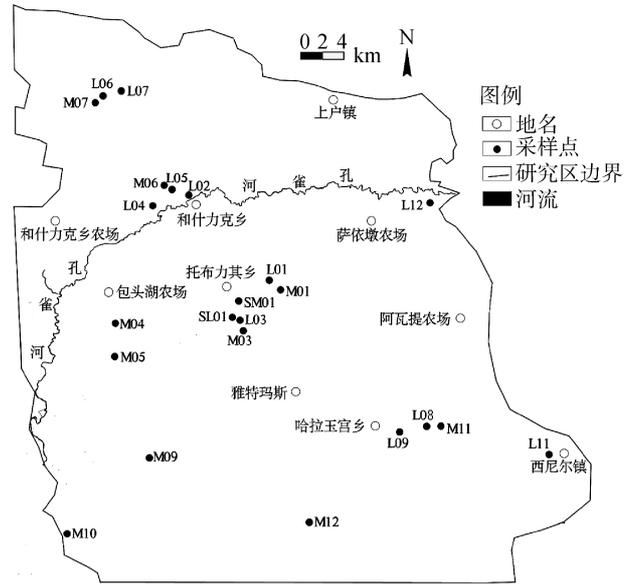


图 1 研究区及采样点分布图
Fig. 1 Studying location and sampling sites

表 1 土壤含盐量值
Table 1 The values of soil salinity

编号	含盐量 (g/kg)			编号	含盐量 (g/kg)		
	0~20 cm	20~60 cm	60~100 cm		0~20 cm	20~60 cm	60~100 cm
L01	0.76	0.66	0.53	M01	1.03	0.98	0.92
L02	0.82	1.14	1.56	M03	2.25	1.75	1.30
L03	4.97	3.48	1.75	M04	5.32	3.46	2.76
L04	0.89	0.49	0.82	M05	4.02	4.15	3.78
L05	0.54	0.37	0.30	M06	4.88	0.75	0.50
L06	4.42	2.86	2.54	M07	4.51	3.94	3.44
L07	4.41	3.53	2.64	M09	5.29	2.67	2.26
L08	0.35	0.28	0.20	M10	1.58	0.95	1.13
L09	0.60	0.70	1.14	M11	1.24	0.39	0.37
L11	0.45	0.40	0.30	M12	11.28	10.28	8.30
L12	0.85	1.82	2.45	SM01	1.94	1.58	1.05
SL01	4.31	1.02	0.71				

1.3 数据处理与分析

本文利用 SPSS.Statistic.v19.0 对数据进行传统统计分析及正态分布检验, 利用 GS+version9 对不符合正态分布的数据进行对数转换并进行半方差函数的计算及拟合, 利用 Surfer 8.0 根据拟合模型及其参数进行 Kriging 插值, 生成土壤盐分的 2 维空间分布等值线图。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分的统计特征分析及正态分布检验

利用 SPSS.Statistics.v19.0 对数据进行描述性统计分析及正态分布检验, 各层土壤盐分统计特征值见表 2。从表 2 可以看出, 研究区在 0~20、20~60、60~100 cm 土层深度内土壤含盐量均值随深度的增

表 2 各土层盐分的统计特征值
Table 2 Statistical eigenvalues of soil salinity at all depths of soil profiles

深度(cm)	样本数	均值(g/kg)	标准差(g/kg)	极大值(g/kg)	极小值(g/kg)	变异系数
0~20	23	2.90	2.61	11.28	0.35	0.90
20~60	23	2.07	2.20	10.28	0.28	1.06
60~100	23	1.77	1.77	8.30	0.20	1.00

大而减小，分别为 2.90、2.07、1.77 g/kg，根据干旱区土壤盐化分级标准，0~20 cm 和 20~60 cm 属中度盐渍土，60~100 cm 属轻度盐渍土^[15]，变异系数反映的是相对变异，即随机变量的离散程度， C_v 0.1 为弱变异性， $0.1 < C_v < 1$ 为中等变异性， $C_v > 1$ 为强变异性^[16]。研究区各土层变异系数分别为 0.90、1.06 和 1.00，即研究区各层土壤盐分的变异系数基本处于强变异性范围。

对土壤含盐量的传统统计分析只能概括土壤盐分状况的全貌，不能反映其局部的变化特征，即

只在一定程度上反映总体状况，不能定量刻画土壤盐分分布的随机性和结构性、独立性和相关性。为此，需采用地统计方法进行空间变异结构的分析和探讨。半方差函数计算要求数据服从正态分布或近似正态分布，否则可能存在比例效应，正态分布检验是地统计方法研究空间变异的前提^[17]。本次研究利用 SPSS19.0 软件选用 Q-Q 检验图法对数据进行正态分布检验。经验证，3 个土层深度均符合对数正态分布，经对数转换后的 Q-Q 检验图见图 2。

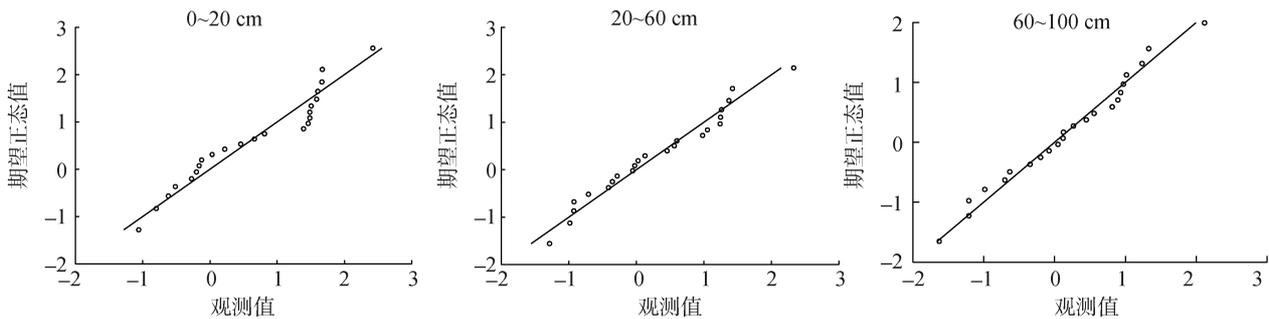


图 2 各层土壤含盐量 Q-Q 检验图
Fig. 2 The Q-Q test chart of soil salinity values for each layer of soil profiles

2.2 土壤盐分空间变异的半方差分析

半方差函数是在任意方向上，相距为 $|h|$ 的两个区域化 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 的增量的方差^[6]，是用来描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的，其中块金系数、基台值、变程作为半方差函数的重要参数，用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度^[18]。假设区域化变量满足二阶平稳和本征假设，其半方差函数见式(1)。

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

式中： $\gamma(h)$ 为半方差函数； h 为分隔两样点的矢量，称为步长； $N(h)$ 为相距为 h 的样点对数目； $Z(x)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值^[19]。

半方差函数一般用变异曲线来表示，当定量描述研究区域的变异特征时，需要建立变异函数的理论模型^[18]。

利用 GS+ 将不符合正态分布的数据进行对数转换，各层土壤盐分地统计学的半方差模型及其拟合参数见表 3，半变异函数图及其模型拟合结果见图 3。

表 3 半方差模型及其拟合参数
Table 3 Semi-variance model and corresponding fitting parameters

深度(cm)	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$ (%)	变程 A_0 (km)	决定系数	残差
0~20	高斯模型	0.741	3.492	21.2	47.01	0.719	0.988
20~60	高斯模型	0.651	3.312	19.6	55.05	0.526	1.35
60~100	高斯模型	0.530	4.070	13.0	56.06	0.712	0.994

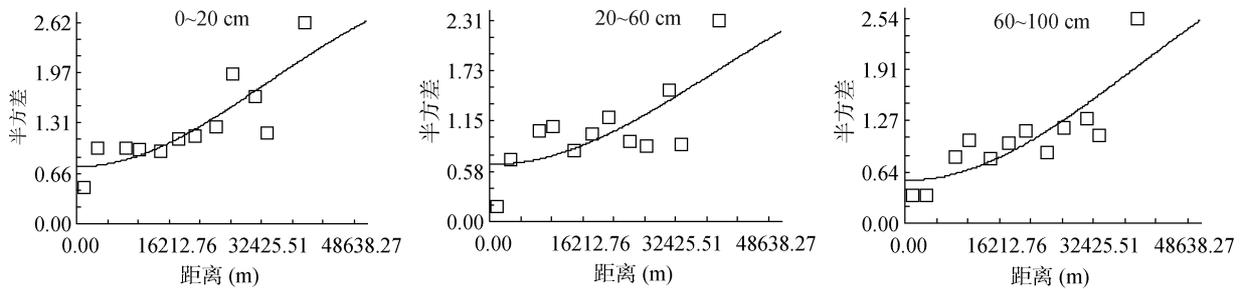


图 3 各层土壤含盐量半方差图

Fig. 3 The semi-variance grams of the soil salinity for each layer of soil profiles

由表 3 可知,各层土壤盐分的半变异函数均符合高斯模型,决定系数分别为 0.719、0.526 和 0.712,理论模型与实验变异函数拟合效果较好。块金值(C_0)表示随机变异的大小,主要有两个来源:一是来源于小于最小取样间隔内的土地利用、灌溉、种植、管理等自然过程造成的变异,二是来源于实验误差。结构性方差(C)表示系统变异的大小,反映土壤母质、地形、植被等环境因素造成的变异。基台值(C_0+C)是变异函数达到的极限值,基台值约等于变量的总方差。块金值与基台值的比值(C_0/C_0+C)反映随机变异占总变异的大小,该比值高,说明由随机分布引起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大。块金值/基台值 $<25\%$,空间相关性强;在 $25\% \sim 75\%$ 之间,空间相关性中等; $>75\%$ 时,空间相关性弱^[20]。各层土壤的块基值比分别为 21.2%、19.6% 和 13.0%。比值 $<25\%$,具有强空间相关性,且随深度增加,比值逐渐降低,表明空间相关性逐渐增加,受结构性因素影响逐渐加大,人为因素对土壤含盐量影响减弱。变程是随机变量在空间上的自相关尺度^[21],在变程之内,空间上是越靠近的点之间的相关性越大,相距大于变程的点之间不具备相关性^[22],土壤盐分的空间变程随深度增加逐渐变大,分别为 47.01、55.05、56.06 km。这是由于表层受人因素影响较大,受结构性因素影响较小,随深度增加,前者影响减小,后者影响增大,使土壤含盐量的自相关尺度加大。

2.3 土壤盐分的空间分布特征分析

利用 surfer 软件对由土壤样品测定的土壤含盐量进行 kriging 插值,绘制农业灌区土壤含盐量分布图,并根据 2014 年 10 月的统测资料绘制了灌区水位埋深等值线图(图 4)。由图可知,农业灌区土壤盐分具有表聚性,随土层深度增加,土壤含盐量呈减小趋势,这是因为研究区降水稀少、蒸发作用强烈、淋溶作用微弱,盐分在毛细管作用影响下向地表聚集。另外各层土壤含盐量由上游至下游呈先增大后减小的

趋势,结合水位埋深等值线图可知,中游地带水位埋深很浅,毛细作用强。同时,土壤含盐量随距孔雀河距离的增大而缓慢增加,这是因为据河流越远,地表水资源越缺乏,灌溉水中高 TDS 的地下水所占比例越大。在灌区的南部出现含盐量高值区,而南部为地下水强烈开采区,几乎只引用高矿化度的地下水进行灌溉。在垂直方向上,随着深度的增大,蒸发作用对盐分累积影响逐渐减弱,盐分含量逐渐减小。

2.4 土壤盐化成因分析

土壤盐化的形成主要受土壤母质、地形、气候等结构性因素,以及灌溉不当等人因素影响。主要体现在几个方面:研究区土壤母质盐分较高,气候干旱,地面蒸发强烈,降雨稀少,水位埋深浅,土壤及地下水中的可溶性岩类随上升水流蒸发、浓缩,累积于地表;通过对裸地等含盐量较高的土地进行灌溉洗盐来扩大农业规模,使盐分随水流运移到土壤及地下水中,增大其盐分含量;随着农业规模的迅速扩大,在作物生长季存在季节性缺水,地表水供水紧张,因此开采地下水(TDS 高)进行灌溉,且开采规模逐渐加大,机井开采数量增加(由 20 世纪 80 年代末的 100 眼增加到现状的近 400 眼),开采深度增加(由 50 ~ 70 m 增加到 150 m 左右)。高 TDS 地下水对土壤进行灌溉必然导致其 TDS 增大;区内农业灌溉方式以大水漫灌为主,在重灌轻排的情况下,使地下水位埋深变浅,在强烈的蒸发作用影响下,水去盐留,加重土壤盐渍化现象;由于大片草地、林地被开垦成农业导致植被逐步退化和消亡,取而代之的是不同程度的沙化地。

3 结论及建议

3.1 结论

1) 孔雀河流域农业灌区土壤含盐量随深度的增大而减小,0~20、20~60、60~100 cm 土层深度处的含盐量均值分别为 2.90、2.07 和 1.77 g/kg,0~20 cm 和 20~60 cm 属中度盐渍土,60~100 cm 属轻度盐

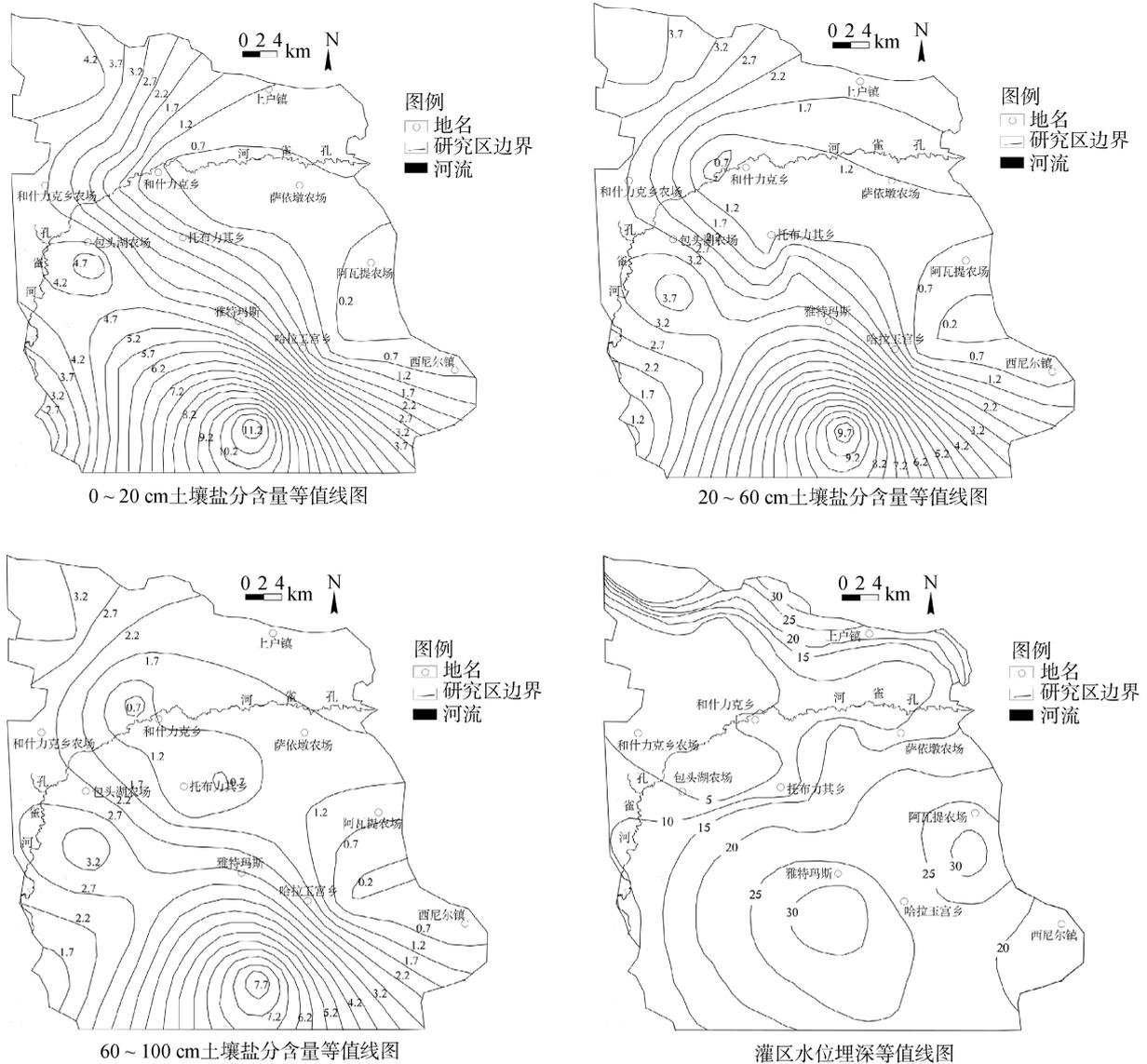


图 4 各层土壤含盐量等值线图 (g/kg)及灌区水位埋深等值线图

Fig. 4 The isoline of the soil salinity for each layer (g/kg) in soil profiles and the depth map of irrigated area

渍土。各土层深度从上游到下游土壤盐分含量逐渐增大。且随距孔雀河距离的增大土壤盐分含量呈增加的趋势，且在地下水强烈开采区出现土壤盐分含量高值区。

2) 研究区各土层深度处土壤含盐量变异系数分别为 0.90、1.06 和 1.00，变异系数基本处于强变异性范围。块基值比分别为 21.2%、19.6% 和 13.0%，比值<25%，具有强空间相关性，且随深度增加，比值逐渐降低，表明空间相关性逐渐增加，受结构性因素影响逐渐加大，人为因素对土壤含盐量影响减弱。空间变程随深度增加逐渐变大，分别为 47.01、55.05、56.06 km。

3) 孔雀河流域气候干旱、地面蒸发强烈、降雨稀少、水位埋深浅以及土壤母质盐分较高等结构性因素是土壤盐渍化的主要控制因素，而灌溉不良等人为因素是造成土壤次生盐渍化的主要原因。

3.2 建议

1) 为了减弱蒸发作用进而防止盐分在土壤中积聚，应完善灌排体系，增大地下水位埋深。

2) 为避免由于水资源短缺、不断开采高矿化度地下水进行农业灌溉从而引发土壤盐化的环境地质问题，建议控制当地农业发展规模，发展节水型作物，同时尽量采用对土壤盐分含量影响较小且节水的膜下滴灌的灌溉方式进行灌溉。

参考文献：

[1] 杨劲松. 土壤盐渍化研究展望[J]. 土壤, 1995, 27(1): 23-27

[2] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144

[3] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review[J]. Catena, 1998, 32(3):

- 155–172
- [4] 颜安, 蒋平安, 盛建东, 等. 玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 410–414
- [5] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, et al. Prediction of soil properties by digital terrain modelling[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(3): 295–311
- [6] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 等. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2 695–2 705
- [7] Journel A G, Huijbregts C J. Mining geostatistics[M]. America: Academic Press, 1978
- [8] 李艳, 史舟. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178–182
- [9] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives[J]. Geoderma, 1999, 89(1): 1–45
- [10] 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
- [11] 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1983
- [12] Bresler E. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions[J]. Water Resources Research, 1973, 9(4): 975–986
- [13] 尹业彪, 李霞, 郭玉川, 等. 孔雀河畔土壤盐分空间变异及格局分析[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(3): 244–249
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[J]. 上海: 科学技术出版社, 1978: 196–211
- [15] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [16] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 9(9): 10–21
- [17] 吴向东. 滨海盐碱地田块尺度土壤水盐空间变异的初步研究[D]. 西安: 长安大学, 2012
- [18] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [19] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 20–27
- [20] 吴黎军, 贺军亮, 冯晓森. 地统计学及其在土壤生态学中的应用与进展[J]. 安徽农业科学, 2009(25): 12 353–12 356
- [21] 于淑会, 白璐, 刘慧涛, 等. 河北滨海平原土壤盐分空间异质性与淋排均质化作用研究[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1 135–1 141
- [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]. 北京: 中国地质大学, 2012

Soil Salinity Spatial Distribution and Variation Characteristics in Irrigated Land of Kongque River Basin

ZHANG Xue¹, CHEN Yaoyuan¹, ZHANG Pan², YANG Fengtian^{1*}

(1 Institute of Water Resources and Environment, College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China; 2 The Coal Field Perambulation Design Research Institute of Jilin Province, Changchun 130062, China)

Abstract: This study was conducted to find out soil salinity spatial distribution and variation characteristics of Kongque River basin, and in turn to provide scientific basis for the amelioration and utilization of saline soil. Soil samples in each layer from 25 profiles were collected to determine the salinity of the soil. The spatial variation characteristics of soil salinity were investigated with the methods of geostatistics, and then the map of soil salinity spatial distribution was made. The results showed that the soils from 0–20 cm and 20–60 cm layers are in a moderate salinization and these from 60–100 cm layer are in a mild salinization. The soil salinity of each layer exhibited great spatial variation. The nugget-to-sill ratios are smaller than 25%, so the spatial correlations are strong. The spatial variation of soil salinity was mainly determined by structural factors. The soil salinity showed obvious spatial distribution regularity. In the horizontal direction, soil salinity increased firstly and then decreased from the upper river to the lower reaches. The salinization also increased with the increasing distance from the river. In the vertical direction, soil salinity decreased with the increasing depth of the soil profiles.

Key words: Kongque River basin; Geostatistics; Soil salinity; Spatial variation