

银北灌区土壤盐分多尺度空间变异特征分析

吴霞¹, 樊丽琴^{1,2}, 王长军¹, 张永宏¹

(1.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏银川 750002; 2. 国家盐碱地综合利用技术创新中心银川试验站, 宁夏银川 750002)

摘要: 明晰不同区域盐渍化土壤分布特征是精准改良盐碱地的基础, 研究宁夏银北灌区土壤盐分空间分布特征, 为盐碱地改良提供依据。以宁夏银北灌区为研究对象, 采用经典统计学和地统计学方法分析了 6.0、1.0、0.2 km 采样尺度下土壤盐分分布特征以及空间变异特性。结果表明, 在 6.0、1.0、0.2 km 采样尺度下研究区 0~20 cm 表层土壤盐分含量整体偏高, 且分布不均, 差异性较大, 变异系数分别为 0.927、0.932、1.187, 达到中强变异水平; 土壤盐分的半方差函数块基比分别为 32.653%、38.462%、41.463%, 属于中等强度空间自相关。随着采样间隔的增大, 土壤盐分空间自相关性增强, 种植、灌溉、施肥等随机因素对土壤盐分空间异质性的影响逐渐减弱, 而气候、水文、地形、土壤等结构因素对土壤盐分空间分布的影响不断增强。建议在随机因素影响较大的中小尺度上增大采样量, 以深入了解土壤盐分的空间分布特征和变异规律。

关键词: 土壤盐分; 多尺度; 空间变异; 银北灌区

中图分类号: S159.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)02-0124-05

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.02.005

Characterization of Multi-scale Spatial Variability of Soil Salinity in the Yinbei Irrigation District

WU Xia¹, FAN Liqin^{1,2}, WANG Changjun¹, ZHANG Yonghong¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan Ningxia 750002, China; 2. Yinchuan Experimental Station of National Technology Innovation Centre for Comprehensive Utilization of Saline and Alkaline Land, Yinchuan Ningxia 750002, China)

Abstract: Analyzing the distribution characteristics of saline-alkaline soils in different regions is the basis for accurate improvement of saline-alkaline lands. In this study, we analyzed the spatial distribution characteristics of soil salinity in the Yinbei irrigation district of Ningxia, providing a basis for saline-alkali land reclamation. Using the Yinbei irrigation district of Ningxia as the research object, classical and geostatistical methods were used to analyze the distribution characteristics and spatial variability of soil salinity at sampling scales of 6.0, 1.0, and 0.2 km, respectively. The results showed that at the 6.0, 1.0, and 0.2 km sampling scales, the salinity content of the surface soil (0 to 20 cm) in the study area was high and unevenly distributed with large variability, and the coefficients of variation (CV) were 0.927, 0.932 and 1.187, respectively, indicating medium-high level of variability. The half-variance functions of the soil salinity at the three sampling scales were 32.653%, 38.462% and 41.463%, respectively, indicating a moderate spatial autocorrelation. With the increase of sampling interval, the spatial autocorrelation of soil salinity increased. The influence of random factors such as planting, irrigation and fertilization on the spatial heterogeneity of soil salinity gradually weakened, whereas the influence of structural factors such as climate, hydrology, topography, and soil properties on the spatial distribution of soil salinity was continuously enhanced. It is recommended to increase the sampling volume at small and medium scales, where random factors have a greater influence, in order to gain a deeper understanding of the spatial distribution characteristics and variability patterns of soil salinity.

Key words: Soil salinity; Multi-scale; Spatial variability; Yinbei irrigation district

土壤在大小尺度上都存在空间异质性, 不同空间分布的土壤属性值存在明显差异^[1-2]。土壤性质的空间变异性是尺度的函数, 即同一变量在不

同尺度上的自相关程度差异很大, 随着样点间距的增加, 变异函数值的随机分量也随之增加, 较小尺度上的结构特征会被掩盖, 不利于深入分析

收稿日期: 2024-01-31; 修订日期: 2024-06-12

基金项目: 宁夏自然科学基金 (2022AAC03458); 宁夏重点研发计划 (2023BCF01050); 国家重点研发计划子课题 (2021YFD1900605-05)。

作者简介: 吴霞(1984—), 女, 宁夏吴忠人, 助理研究员, 硕士, 主要从事土壤调查与健康评价研究工作。Email: wuxia-xia@163.com。

土壤性质的空间变异性,但多尺度上的研究可以很好地解决这一问题^[3-4]。目前,很多研究已经注意到土壤盐分的高空间变异性及其在不同时空尺度上的变化规律差异较大^[5-7]。刘继龙等^[8]通过对土壤水盐空间异质性和尺度效应的多重分形分析,揭示了林地水盐空间分布特征和尺度效应。乔学瑾等^[9]研究发现,新疆安集海灌区棉田耕层土壤盐分呈强空间自相关性,且随采样尺度的增大自相关性增强。因此,有必要研究多尺度下土壤盐分的空间变异特征及其影响因素,为盐碱地改良和可持续利用提供技术支撑。

土壤盐渍化一直是影响宁夏灌区农业生产的重要因素,多年来宁夏通过水、农、林等综合措施治理土壤盐渍化,盐渍化耕地面积逐年减少,耕层土壤含盐量逐年降低,土壤盐渍化改良取得了显著效果^[10-11]。高含盐量的盐渍土多呈“插花状”分布,影响盐碱化改良区的稳定性^[12],难以实现全面改良利用。因此,众多研究者在宁夏灌区土壤盐渍化空间分布特征及演变规律等方面做了较多研究^[13-17],但不同尺度下土壤盐分空间异质性及其影响因素尚不明确。因此,我们以宁夏银北灌区为研究对象,运用半变异函数、空间相关性、地理探测器等地统计学理论研究该区土壤盐分在不同尺度的空间异质性及其环境影响因子,以为银北灌区土壤盐分空间分布特性、盐渍化土壤的科学管理、合理改良和高效利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

银北灌区(105° 52' 52" ~ 106° 58' 3" E、38° 26'

57" ~ 39° 22' 52" N)位于宁夏平原北部,地处西北内陆地区,属于典型的大陆性干旱气候,年平均气温 9.4 ℃,平均日照时数 3 008.6 h,历年平均降水量 173.2 mm,多集中在 6—9 月份,年平均蒸发量 1 755.0 mm,是降水量的 10 倍左右^[18-19]。宁夏银北灌区西依贺兰山东临黄河,地形多以平原为主,但有平地、阶地、河漫滩、低洼地等多种微地形,平均地下水埋深 1.5 m 左右,且矿化度较高,土壤类型以盐化灌淤土和潮土为主,种植作物有玉米、水稻、小麦、油菜、苜蓿等^[20]。受气候、地形、土壤、地下水位、灌排条件等因素的影响,土壤盐渍化空间变异较大,是宁夏盐渍土分布最广、盐渍化最为严重的地区。

1.2 采样点布局

为掌握银北灌区不同尺度土壤盐分空间变异特征,采用大、中、小三级不同尺度嵌套和规则网格布点进行采样,大尺度以银北灌区为采样区(A),共采集 86 个样点,网格大小约为 6.0 km × 6.0 km。在大尺度中选择土壤盐渍化较为严重、土地利用类型、作物种植较为复杂网格单元(6.0 km × 6.0 km)作为中尺度嵌套采样区(B),共采集样点 49 个,网格大小 1.0 km × 1.0 km。最小嵌套采样区(1.0 km × 1.0 km)(C)采样间隔 0.2 km,共采集样点 36 个,网格大小 0.2 km × 0.2 km。不同尺度土壤盐分采样点分布如图 1 所示。

1.3 样品采集与测试

按照室内布点的坐标位置,用 GPS 定位至预设样点附近,避开沟渠、田埂、道路等,定位中心点坐标。采样时除采集中心点土壤外,同时在以该点为中心、半径为 5 m 的圆上均匀采集 4 个

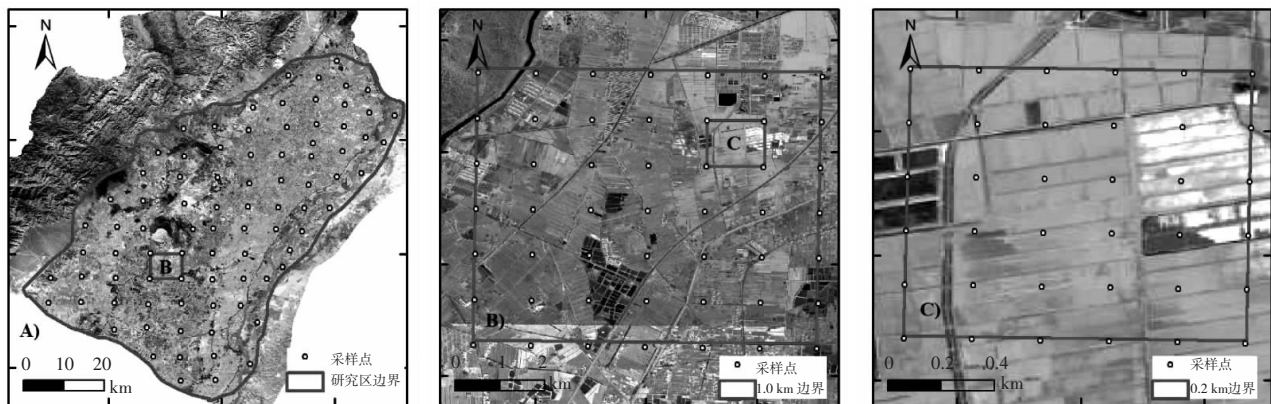


图 1 不同尺度下土壤采样点分布

点,共5点混合为1个土壤样品,采样深度均为0~20 cm,采样时间为2022年3月29日至4月13日。将采集的土壤样品带回实验室,在室温条件下自然风干、研磨,过1 mm筛后采用电导法测定土壤全盐含量^[21]。

1.4 数据处理与分析方法

在数理统计软件 SPSS 25.0 中对研究区不同尺度土壤盐分进行描述性统计分析,并对数据进行正态分布检验,将不服从正态分布的数据集转换为正态分布。在地统计学软件 GS+9.0 中对研究区3种尺度的土壤盐分进行半方差函数分析,调整有效滞后距离和步长,获取最优拟合模型和参数^[22],再利用 ArcGIS 10.2 软件绘制研究区不同尺度土壤盐分分布图。

2 结果与分析

2.1 不同尺度土壤盐分统计特征分析

银北灌区3个采样尺度下表层土壤盐分含量统计特征如表1所示。通过分析可知,研究区0~20 cm 表层土壤盐分含量整体偏高,且分布不均,差异性较大,最小值为0.596 g/kg,最高值达到17.438 g/kg。从平均值来看,6.0 km 和1.0 km 尺度平均土壤盐分均达到轻度盐渍化水平(1~3 g/kg)^[23],分别为2.960、2.085 g/kg;0.2 km 尺度平均土壤含盐量达到中度盐渍化(3~6 g/kg)水平^[23],为3.488 g/kg。从标准差来看,0.2 km 尺度的各样点到平均值的距离最远,分布最为离散,6.0 km 尺度次之,1.0 km 尺度土壤盐分离散程度最小。从变异系数来看,6.0 km 和1.0 km 尺度土壤分盐变异系数为中等强度(0.1~1.0),分别为0.927、0.932;0.2 km 尺度的变异系数则达到强变异水平

(>1.0),为1.187。且土壤盐分的变异系数随着采样间隔的降低而逐渐增强。

2.2 不同尺度土壤盐分的半方差函数分析

初步检验结果显示,3种尺度的土壤盐分均不服从正态分布,故采用对数函数对原始数据进行转换,转换后的数据基本服从正态分布。在 GS+9.0 中对不同尺度土壤盐分转换后的数据进行半方差分析,经多次比较优化,最终确定6.0 km 尺度和1.0 km 尺度为指数模型,0.2 km 尺度为球状模型(表2)。本研究中6.0、1.0、0.2 km 尺度土壤盐分半方差函数的变程分别为24 202、4 879、536 m,均高于各尺度的采样间隔,且3种尺度下最优模型的决定系数均大于0.900,残差平方和均较小,说明半方差函数拟合结果较为理想,利用优化模型及其参数进行空间插值和制图可以较好地反映研究区不同尺度表层土壤盐分的空间分布特征。块基比表示由随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的比例,主要反映研究变量的空间自相关性强弱,块基比越小变量的空间自相关性越强。本研究中3种尺度的土壤盐分的块基比分别为32.653%、38.462%、41.463%,均属于中等空间自相关(25% < 块基比 < 75%),且空间自相关性随着采样尺度的增大略有增强,即随机因素对土壤盐分空间异质性的影响随着采样间距的增加而有所增强。

2.3 不同尺度土壤盐分的空间分布特征分析

根据获得半方差函数最优模型及参数,采用 ArcGIS 10.2 对3种采样尺度下的土壤盐分进行 Kriging 插值,绘制研究区不同尺度表层土壤盐分空间分布图(图2)。可以看出,6.0 km 尺度下研究区以非盐渍化和轻度盐渍化(<3 g/kg)土壤为主,占比为24.47%和61.53%,中重度盐渍化(>3 g/kg)土壤占比约为14.00%,主要分布于研究区中西部的前进农场、暖泉农场和星海镇等地。此外,受局部地形及灌排条件影响,中重度盐渍化土壤在研究区呈“插花状”分布,如研究区北部宝丰镇、黄

表1 不同尺度土壤盐分含量统计特征

尺度 /km	样点数 /个	最小值 / (g/kg)	最大值 / (g/kg)	平均值 / (g/kg)	标准差 / (g/kg)	变异系数
6.0	86	0.596	17.438	2.960	2.743	0.927
1.0	49	0.645	12.080	2.085	1.942	0.932
0.2	36	0.970	15.880	3.488	4.141	1.187

表2 不同尺度土壤盐分半方差函数模型

尺度 /km	模型	块金(C_0) / (g ² /kg ²)	基台值(S) / (g ² /kg ²)	块基比(C_0/S) /%	变程 /m	决定系数(R^2)	残差平方和(RSS) / (g ² /kg ²)
6.0	指数	0.016	0.049	32.653	24 202	0.911	2.315×10 ⁻⁵
1.0	指数	0.015	0.039	38.462	4 879	0.905	1.441×10 ⁻⁵
0.2	球状	0.034	0.082	41.463	536	0.916	7.431×10 ⁻⁵

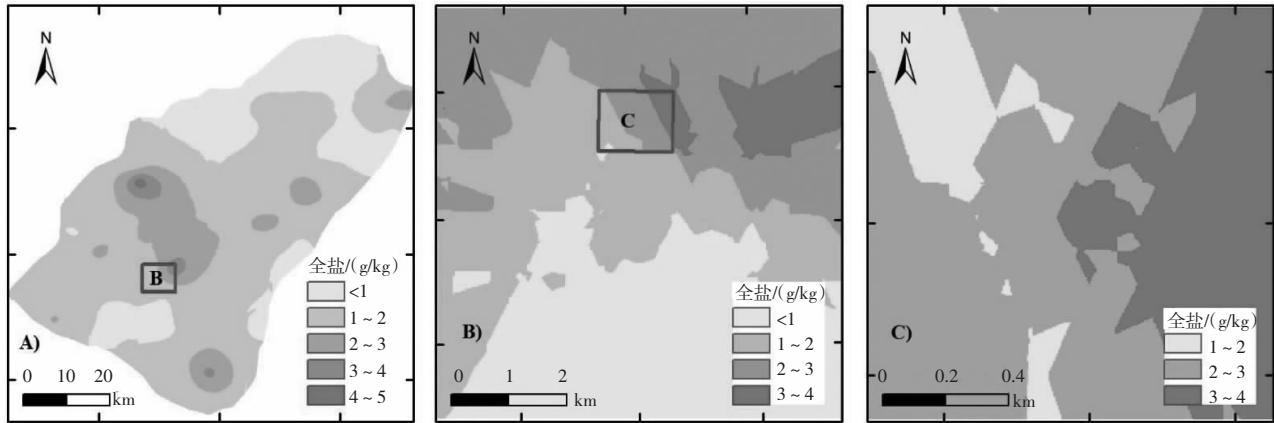


图 2 不同尺度下层土壤盐分空间分布

渠桥镇, 中南部姚伏镇、立岗镇和金贵镇等均有零星分布的中重度盐渍化土壤。1.0 km 和 0.2 km 尺度整体位于盐渍化程度相对较高的区域, 非盐渍化和轻度盐渍化土壤面积明显减少, 中重度盐渍化土壤面积约占 1/3, 占比达到 35.97% 和 34.39%。

3 讨论与结论

受气候条件、水文环境、地形地貌和人类活动等影响, 土壤盐分往往呈现出一定的差异^[7, 12]。研究区在 6.0、1.0、0.2 km 3 种采样尺度下的土壤盐分各项统计特征和变异系数均差异较大, 采样期正处于春季反盐季节, 0~20 cm 表层土壤盐分含量平均值分别为 2.960、2.085、3.488 g/kg, 均达到轻度盐渍化以上, 变异系数分别为 0.927、0.932、1.187, 达到中强变异水平。这表明在 3 种研究尺度下土壤盐分分布不均匀, 变异程度较大。

土壤盐分具有很强的空间变异性, 单一尺度的研究不利于深入分析土壤盐分的空间变异性, 而多尺度的研究可以更准确地表达土壤盐分在不同尺度上的自相关性^[24-27]。半方差函数分析结果显示, 研究区 3 种尺度下土壤盐分的块基比分别为 32.653%、38.462%、41.463%, 均达到中等强度空间自相关, 可见气候、水文、地形、土壤等结构因素对研究区土壤盐分空间分布具有中等强度的影响, 同时种植结构、灌溉和施肥等人为随机因素亦对土壤盐分空间分布具有重要影响。随着采样间隔的增大, 土壤盐分空间自相关性增强, 即人为活动如种植、灌溉、施肥等随机因素对土壤盐分空间异质性的影响逐渐减弱, 而气候、水

文、地形、土壤等结构因素对土壤盐分空间分布的影响不断增强。因此, 在人为活动等随机因素影响较大的中小尺度上, 有必要加密采样数量, 以充分了解土壤盐分的空间分布和变异特征。

参考文献:

- [1] KAUR H, KAUR A, SINGH B, et al. Application of geospatial technology in assessment of spatial variability in soil properties: A review[J]. *Sciencedomain International*, 2020, 39(39): 57-71.
- [2] 姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. *水土保持研究*, 2008(1): 250-253.
- [3] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异[J]. *生态学报*, 2006(2): 349-356.
- [4] 陈彦. 绿洲农田土壤养分时空变异及精确分区管理研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- [5] 李红伟, 邢维芹, 李立平. 不同尺度土壤性质空间变异研究进展[J]. *河南农业科学*, 2006(11): 5-8.
- [6] WANG H, GONG P, LIU G H. Multi-scale variability of soil salinity in the Yellow River Delta[J]. *Geospatial Information Science*, 2007, 6753: 933-941.
- [7] LU L, LI S, WU R, et al. Study on the scale effect of spatial variation in soil salinity based on geostatistics: A case study of yingdaya river irrigation area[J]. *Land*, 2022, 11(10): 1697.
- [8] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 81-86.
- [9] 乔学瑾, 石建初, 谭丽丽, 等. 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J]. *土*

- 壤学报, 2021, 58(5): 1202-1213.
- [10] 贾壮壮, 谭亚男, 管孝艳, 等. 宁夏盐碱地成因及分区治理措施综述[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 122-134.
- [11] 周 华, 盛秀红, 刘 勇. 宁夏灌区土壤盐渍化变化趋势及治理[J]. 中国农业综合开发, 2020(6): 31-33.
- [12] 陆 阳, 王 乐. 宁夏灌区土壤盐渍化治理实践与成效[J]. 南方农业, 2023, 17(5): 54-56; 63.
- [13] 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24.
- [14] 张 旭, 贾科利, 魏慧敏, 等. 银川平原土壤盐分空间分异及影响因子研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 949-960.
- [15] 刘雅清, 王 磊, 赵希妮, 等. 宁夏河套灌区典型区域土壤盐碱化空间变异特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1269-1277.
- [16] 程万莉, 郭帅杰, 蔡立群, 等. 河西绿洲灌区土壤调理剂改良盐碱土的效果初探[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(2): 131-138.
- [17] 孙建好, 郭全恩, 赵建华, 等. 基于甘肃省中低产田现状的改良措施及其应用效果[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(2): 139-144.
- [18] 王晓媛, 孙 娇. 有机肥替代氮肥对银北灌区盐化灌淤土理化性质及玉米生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(1): 51-56.
- [19] 张 智, 林 莉, 陈晓娟. 银川平原气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008(6): 68-72.
- [20] 吴 霞, 蔡进军, 王长军, 等. 银川平原农田土壤细菌群落结构与驱动因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(10): 126-134.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 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.
- [23] 中国农业大学. 土壤质量 盐碱地农业利用土壤分类分级[S]. 北京: 全国土壤质量标准化技术委员会, 2020.
- [24] 冉雯瑞. 滨海盐碱地土壤水盐的空间异质性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [25] 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.
- [26] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江. 不同尺度下土壤盐分空间变异的指示克里格评价[J]. 土壤, 2011, 43(6): 998-1003.
- [27] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 宁夏不同生态类型区土壤养分状况比较分析[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(5): 434-440.

·公益广告·

实现中国式现代化，
必须加快推进乡村全面
振兴。