

盐碱地土壤养分的空间变异及合理取样密度研究

张华杰¹, 陈为峰^{1*}, 宋富贵², 李 晓³, 周 虎⁴

(1.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.东营市国土资源局, 山东 东营 257091; 3.垦利县职业中等专业学校, 山东 东营 257500; 4.泰安市恒源大地景观工程有限公司, 山东 泰安 271018)

摘 要:本研究以东营市河口区新户土地开发项目二期为研究区,运用经典统计法和地统计分析相结合的方法,对土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮等养分以及土壤全盐的空间变异性质进行研究,并对不同采样密度下有机质的空间插值结果进行分析比较,用均方根误差和相关系数检验不同密度下的插值精度,以确定盐碱地有机质的合理取样密度。结果表明,研究区速效钾的变异系数为 18.4%,属于低等程度的变异;有机质、碱解氮、速效磷、土壤全盐的变异系数在 57.4%~76.9%之间,属中等程度变异。研究区的各种土壤属性均具有较好的空间结构,表现出一定的空间自相关性。有机质和速效钾的空间变异性主要影响因素与成土母质、土壤类型、气候条件等有关,而碱解氮、速效磷、土壤全盐的空间变异性与耕作方式及农业生产中施肥等有关。随着采样点密度的增加,克里格插值精度提高,适当减小样点密度可以满足插值分析的需要,充分考虑土壤养分空间变异评价的精度分析,确定研究区土壤有机质合理取样数为 111 个,合理取样单元为 48 hm²,合理取样间距为 692 m。

关键词:盐碱地;空间变异;地统计学;合理样点密度

中图分类号:S159-3

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)02-0120-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0255

引用格式:

张华杰, 陈为峰, 宋富贵, 等. 盐碱地土壤养分的空间变异及合理取样密度研究[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 120-126.

ZHANG Hua-jie, CHEN Wei-feng, SONG Fu-gui, et al. Spatial Variability of Soil Nutrients and Salinity in Saline-alkali Land and Determination of Reasonable Sampling Density[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 120-126.

Spatial Variability of Soil Nutrients and Salinity in Saline-alkali Land and Determination of Reasonable Sampling Density

ZHANG Hua-jie¹, CHEN Wei-feng^{1*}, SONG Fu-gui², LI Xiao³, ZHOU Hu⁴

(1.College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2.Bureau of Land and Resources of Dongying, Dongying 257091, China; 3.Vocational Secondary Specialized School of Kenli, Dongying 257500, China; 4.Hengyuan Earth Landscape Engineering Limited Company of Tai'an, Tai'an 271018, China)

Abstract: Spatial variations of soil organic matter, available nitrogen, phosphorus, potassium alkali-hydro nitrogen and soil salinity were discussed by the means of classical statistics and geostatistics in Land Development Project Phase II of Xinhua Town in Hekou District, Dongying City. Spatial interpolation results of organic matter under different sampling density were analyzed and compared and the interpolation accuracy was tested with the root mean square error and correlation coefficient, in order to determine the appropriate sampling density of organic matter in saline land. The results showed that, the coefficient variation of available K was 18.4%, which belonged to the low degree of variation. The coefficient variations of organic matter, alkali-hydro nitrogen, available phosphorus, soil salt were between 57.4%~76.9%, which belonged to the moderate variation. All the soil properties of the study area had good spatial structure, and showed some spatial autocorrelation. The spatial variability of organic matter and available potassium was related with the soil parent material, soil type and climate conditions whereas the spatial variability of alkali-hydro nitrogen, available phosphorus, soil salt was related with the tillage and agricultural fertilizer practices. As the sampling density increased, Kriging interpolation accuracy was improved. Proper reduction of the sample point

收稿日期:2015-10-26

基金项目:国家自然科学基金(31570522)

作者简介:张华杰(1991—),男,山东东营人,硕士研究生,主要从事土地开发与保护研究。E-mail:18765388142@163.com

*通信作者:陈为峰 E-mail:chwef@sdau.edu.cn

density could meet the needs of the interpolation analysis. The accuracy analysis of spatial variability of soil nutrients was considered, and the reasonable sampling number of soil organic matter in the study area was 111, with the reasonable sampling interval of 48 hm², and the reasonable sampling unit of 692 m.

Keywords: saline-alkali land; spatial variability; geostatistics; optimal sampling density

盐碱地作为珍贵的后备土地资源在地球上分布十分广泛。目前,分布在我国西北、东北及滨海地区的盐碱荒地和盐碱障碍耕地总面积超过 3 333 万 hm²,其中具有农业利用潜力的盐碱地面积约 1 333 万 hm²,约占全国耕地面积的 10%^[1]。盐碱地农业高效利用对我国耕地地力提升、耕地数量的增加,以及国家粮食安全都具有重要意义。

系统认识和掌握土壤养分及盐分的空间分布特征,是治理改良盐碱土的基础。而对于土壤养分及盐分空间变异的研究,就必须充分考虑取样密度,以保证空间插值的精度。一般来说,样本密度越大,样本的误差就越小,研究结果的精度也越高,但采样分析的费用也会随之增加^[2],采样预算和成本在很大程度上也限定了采样点的密度,因此确定合理的样本密度对节约野外取样和室内化验成本,取得准确的研究成果具有重要意义。目前国内外研究主要集中在研究区域土壤属性的空间分布特征及影响因素分析^[3-7],针对盐碱地合理取样密度的相关研究还比较缺乏。有机质是土壤肥力形成的基础,不仅影响土壤的质量和功能,而且在陆地生态系统碳循环中起重要作用^[8]。因此,研究盐碱地有机质的合理取样密度,确定合理取样间距,可以以最小的人力、物力、财力获取研究区的土壤样品,为盐碱地地区土壤有机质的研究提供方便。

本文以东营市河口区新户镇二期项目区为研究区,运用经典统计法和地统计分析相结合的方法,对土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮等养分以及土壤全盐空间变异性质进行研究,并确定了研究区有机质的合理取样密度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以河口区新户土地开发项目二期为研究区,河口区位于黄河三角洲尾端,北、东两面濒临渤海,东南隔黄河与垦利县相望,南与利津毗邻,西同滨州市的沾化县接壤。研究区位于河口区新户镇域内驻地西南,处于北纬 37°50′37″~37°58′53″之间,东经 118°13′03″~118°18′32″之间。研究区属北温带半湿润大陆性气候,气候温和、光照充足、热量丰富、雨热同

期、四季分明。研究区属黄河近代冲击平原,地势平缓,地形南高北低,东高西低。土壤主要为潮土、潮盐土,由于海水侵渍的成土过程,深层土壤含盐量很高。研究区土地利用率较低,垦殖率不高,主要农作物为棉花,也有少部分小麦和果树。

1.2 数据来源与处理

本研究于 2012 年 1 月 2 日开始在野外采集土壤样品。采用均匀网格取样法,以 400 m 为间距结合研究区实际情况确定 503 个取样点(图 1)。用 GPS 对每个采样点定位,采样时以网格结点为圆心,在 50 m 范围内采集 0~20 cm 深度土层土壤样品 3 个,均匀混合后作为该点的土壤样品。所有土样自然风干后,将风干样品压碎,用 2 mm 孔径筛过筛,供土壤全盐、速效磷、速效钾的测定。将部分通过 2 mm 孔径筛的土样继续研磨,使之全部通过 0.25 mm 孔径供有机质、碱解氮等项目的测定。

测定指标包括土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、土壤全盐含量。土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;采用醋酸铵浸提火焰光度计法测定速效钾;土壤全盐含量用烘干残渣质量法测定^[9]。

本研究采用域法^[10]对异常值进行处理,即剔除掉与平均值的偏差超过 3 倍标准差的测定值,经处理后有机质样点数为 467 个、碱解氮样点数为 486 个、速效磷样点数为 482 个、速效钾样点数为 463 个、土壤全盐样点数为 481 个。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤养分的空间变异性研究方法

本研究以 ArcGIS 10.0 为平台,将采样点数据加载到 ArcGIS 中生成空间点位图(图 1),利用 ArcGIS 地统计模块进行半变异分析;结合半变异分析结果,在 ArcGIS 中利用 Kriging 插值得到研究区的土壤养分空间分布,并利用 ArcGIS 的空间分析功能,统计研究区内各土壤养分及盐分的分布特征^[11]。

1.3.2 有机质合理取样密度的确定方法

本研究以有机质为例,确定研究区合理取样密度。以有机质的 467 个取样点为标准,利用 ArcGIS 地

统计分析模块的生成要素子集命令自动将采样点数据随机均匀去掉 30% 的样点, 然后以剩下的再次执行这个操作, 依此类推, 得到 467、326、228、159、111、78、55、37 个样点。

本研究采用独立数据集验证的方法来评价在不同采样点数目下的插值精度, 从而避免了交叉验证方法无法描述空间模拟误差的缺点。计算实测值和预测值的均方根误差 (RMSE), 均方根误差越小, 预测值越接近真实值; 计算预测值和实测值的相关系数 (r), 相关系数越大, 预测误差就越小, 精度就越高。用 Excel 数据分析中的相关系数, 可以得到真实值与各组预测值之间的相关系数^[11]。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分及盐分的统计特征分析

由表 1 可以看出, 研究区内土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾和土壤全盐平均含量分别为 $11.447 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $37.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.122 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $132.619 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.311 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中速效钾根据全国第二次土壤普查分级标准达到高等水平, 有机质处于中等水平, 碱解氮、速效磷含量水平较低, 土壤全盐含量较高。经 K-S 检验, P 值大于 0.05, 数据近似服从正态分布, 满足克里格插值的要求。变异系数能够反映土壤性质空间变异性的变化, 速效钾的变异系数为 18.4%, 属于低等程

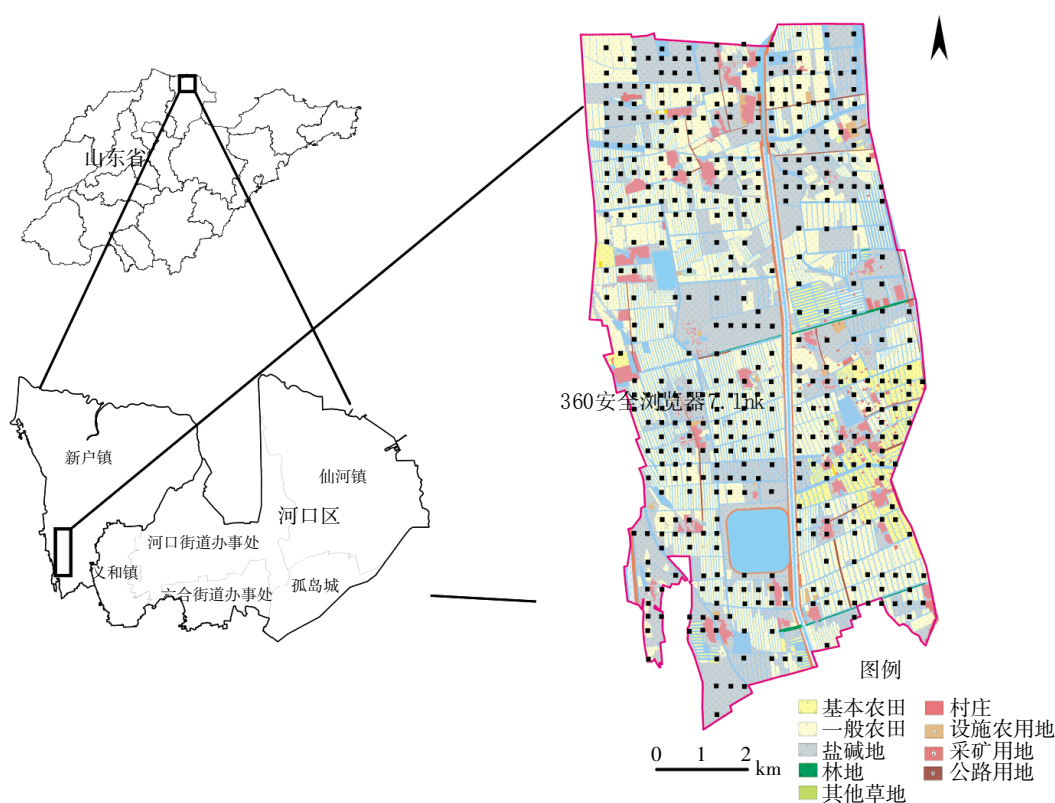


图 1 研究区土壤采样点分布

Figure 1 Distribution of soil sampling points in research area

表 1 研究区土壤养分及盐分描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics characteristics of soil nutrition and soil salinity in research area

土壤属性 Variables	极小值 Min	极大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%	K-S 检验 P
有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.320	29.250	11.447	6.573	0.147	-0.639	57.4	2.265
碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.500	130.200	37.015	22.689	0.965	1.172	61.3	2.986
速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.120	24.540	5.122	3.160	1.135	2.666	61.7	1.712
速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	77.130	214.250	132.619	24.451	0.316	-0.125	18.4	2.241
土壤全盐/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.020	35.980	6.311	4.854	2.042	6.306	76.9	1.325

度的变异。研究区有机质、碱解氮、速效磷、土壤全盐的变异系数在 57.4%~76.9%之间,属中等程度变异,大小顺序为土壤全盐>速效磷>碱解氮>有机质。速效磷的变异系数分别为 61.7%,显著高于其他养分。土壤全盐变异系数为 76.9%,这与当地一些盐碱土改良措施有关,如修建台田,使盐碱逐渐下渗而变为良田。

2.2 土壤养分的空间变异性

使用速效钾原始数据和有机质等 4 种养分对数转换后的数据进行半方差函数的拟合。从表 2 可知,研究区的各种土壤属性均具有较好的空间结构,表现出一定的空间自相关性。有机质和速效钾的块金效应分别为 34.38%、26.87%,说明在本研究区中,有机质和速效钾的空间变异性主要影响因素与成土母质、土壤类型、气候条件等有关,其空间变异性受人为因素影响较小。碱解氮、速效磷、土壤全盐的块金效应分别为 62.20%、64.11%、50.00%,说明这 3 种养分的变化与耕作方式及农业生产中施肥等有关,其空间变异性受人为因素影响较大。

变程表明土壤特性的空间依赖性^[1],从表 2 中土壤养分之间的空间自相关距结果分析,该研究区域内

各土壤养分之间的空间自相关距都比较大,空间依赖性大小可以排列为碱解氮>速效钾>土壤全盐>速效磷>有机质。其中碱解氮的空间自相关较大,明显高于其余 4 种养分,而最小的为有机质,也达到了 2 945 m,说明本研究区内在一定范围内各土壤养分的分布存在着空间相似性。

2.3 有机质合理取样密度的确定

对于区域土壤养分空间分布的掌握,样点数量越多,密度越大,越能接近实际,但由于土壤野外采样和室内分析成本较高,土壤采样点的合理密度和位置的确定十分关键^[11]。本文以土壤有机质为例,以全部样点数克里格插值的预测精度作为基准,将全部采样点数据随机均匀去掉 30%的样点得到共包含 8 组采样梯度,对比不同采样取样点密度下普通克里格插值的精度,从而确定合理的取样密度。

表 3 为 8 组有机质采样梯度下模拟的半方差相关参数。普通克里格预测精度主要受半方差推断的可靠性和样点对研究区域覆盖的均匀性、完整性 2 方面的影响^[13]。从表 3 可以看出 37 个点和 55 个点的拟合效果较差,变程明显变小,相关系数值偏低,不能有效地反映有机质的空间相关结构,说明这 2 组数据不

表 2 土壤养分及盐分的半方差函数及拟合参数

Table 2 Semi-variogram and the fitting parameters of soil nutrition and soil salinity

养分项目 Nutrition items	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value	基台值 Sill value	变程 Range/m	残差 RSS	拟度 R^2	块金效应/% Nugget variance
有机质	球状模型	0.318	0.925	2 945	9.095×10^{-3}	0.926	34.38
碱解氮	指数模型	0.255	0.410	30 390	1.15×10^{-2}	0.551	62.20
速效磷	球状模型	0.309	0.482	3 160	7.817×10^{-3}	0.904	64.11
速效钾	指数模型	0.018	0.067	5 070	1.686×10^{-5}	0.948	26.87
土壤全盐	指数模型	0.263	0.526	4 560	5.703×10^{-3}	0.901	50.00

表 3 不同样点密度下土壤有机质变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Best fitted semivariogram models and corresponding parameters of soil organic matter in different sample values

样点数 Number	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value	基台值 Sill value	变程/m Major range	步长/m Lag size	块金效应% $C_0/C+C_0$	均方根误差 RMSE	相关系数 r
467	球状模型	0.37	0.73	2 508.67	416.11	50.31	6.108	0.687
326	球状模型	0.39	0.76	2 580.95	379.57	50.79	6.285	0.650
228	指数模型	0.42	0.68	3 072.26	431.85	62.39	6.277	0.558
159	球状模型	0.35	0.66	3 440.65	538.35	52.86	6.392	0.535
111	指数模型	0.49	0.78	3 496.13	377.71	62.56	6.614	0.443
78	球状模型	0.51	0.89	3 485.81	504.07	57.02	6.852	0.423
55	球状模型	0.45	0.83	627.90	96.47	53.86	7.492	0.366
37	球状模型	0.55	0.70	828.10	175.00	79.37	6.639	0.309

能较好地表达研究区域覆盖的均匀性、完整性。其他 6 组数据拟合效果较好且与全部取样点的预测精度相似,均呈现中等程度的空间相关性,空间连续性范围较大。从总体情况上来看,78 个点就可较好地模拟出有机质的空间结构特征。

从图 2 交叉验证结果来看,随着采取样密度的减小,有机质的 RMSE 呈增大趋势,从 326 个样点减小到 111 个样点时, RMSE 增大不明显;随着采样密度的减小, r 呈减小趋势,当采样点从 111 减小到 78 个样点时, r 变化相对平缓。综合考虑前面半方差函数理论模型的分析、取样费用以及 RMSE 和 r 的变化情况,本研究区有机质合理的取样点数应控制在 111 个以上。

从图 3 有机质空间分布情况分布来看,随着采样点密度的增加,呈现的空间信息越丰富。从图 3 中可以看出 111、159、228、326 个样点时有机质的空间分布与 467 个样点基本一致,也就是说 111 个样点就可

以基本代表研究区土壤有机质的空间分布状况。而当采样点再减少时,呈现的空间信息相对比较简单,不能准确充分地表现有机质的局部变异。综合以上分析,在保证一定插值精度的情况下,111 个点可以很好地表现有机质的空间分布信息。

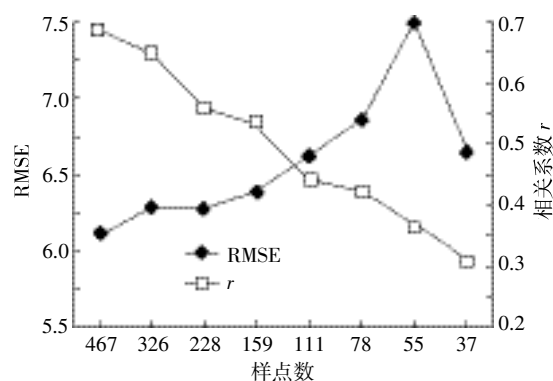


图 2 取样密度与有机质 RMSE 和相关系数 r 的关系

Figure 2 Correlation between sample number and RMSE & r

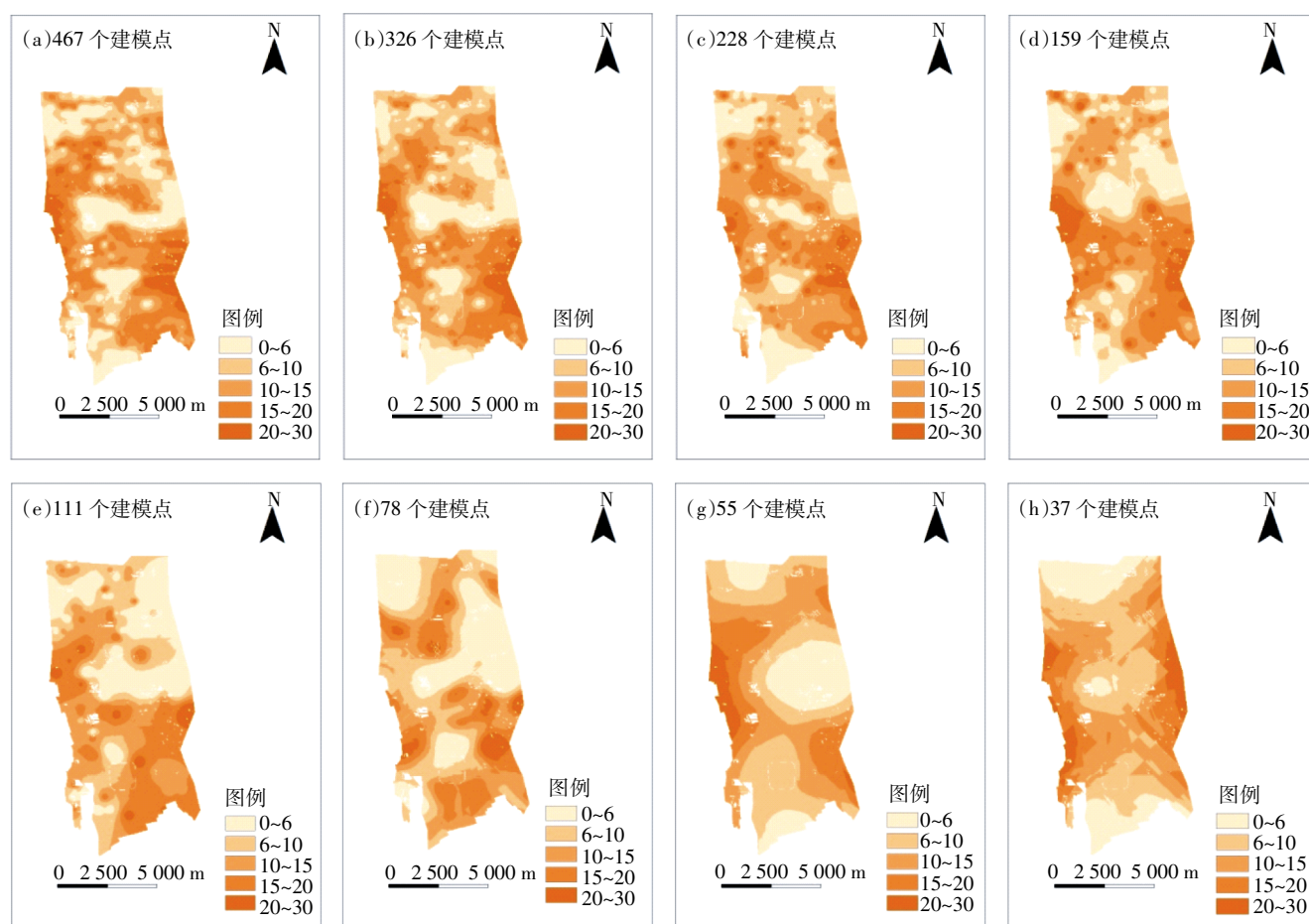


图 3 不同样点数下有机质克里格插值图

Figure 3 Soil organic matter spatial distribution in different sample numbers

在地统计学中,半方差函数的变程反映了样点之间存在空间相关性的最大距离,因此可以作为取样设计时的一个重要准则^[14]。Kerry等^[15]认为取样间距要小于变程的一半,而小于变程的1/10则又是一种浪费。

综上可知,研究区有机质的合理取样数为111,变程为2 945 m,由样点间距 $=\sqrt{\text{区域面积} \div \text{样点数}}$ ^[14],得出有机质的合理取样间距为692 m,取样间距约为变程的1/4,合理取样单元为48 hm²。

已有较多学者对有机质合理取样密度进行了研究,但他们的研究多集中在山地丘陵或内陆平原地区,关于盐碱地有机质合理取样密度的研究相对较少,本文以东营市新户二期项目区为对象,对滨海平原盐碱地进行了研究分析。本研究确定盐碱地合理取样单元为48 hm²,合理取样间距为692 m。而赵倩倩等^[16]基于土壤养分的空间相关性和克里格插值的独立验证得出费县有机质合理取样间距约为1 352 m,因为该研究区地处鲁中、鲁南山区之间,主要为山地丘陵区,平原较少。齐雁冰等^[11]认为县域农田有机质最大取样间距为421.9 m,该研究区位于关中平原西部。以上研究表明,取样间距与地貌类型有关,一般来说,丘陵地区的取样间距大于平原地区,这也与张志霞等^[12]对黄土高原不同地貌区有机碳合理数的研究结果一致。本研究区为典型黄河三角洲滨海平原,有机质的空间自相关距大于关中平原地区而小于山地丘陵区,因此合理取样间距介于二者之间。

3 结论

(1)通过对研究区土壤大面积采样调查及室内分析,同时结合地统计学和GIS技术,详细展示了研究区土壤肥力和盐分的基本状况,研究区总体肥力水平较低,含盐量较高。研究区土壤有机质、碱解氮、速效磷、全盐属中等程度变异,速效钾属于低等程度的变异。

(2)研究区的各种土壤属性均具有较好空间自相关性。有机质和速效钾的空间变异性主要影响因素与成土母质、土壤类型、气候条件等有关,碱解氮、速效磷的空间变异性与耕作方式及农业生产中施肥等有关,土壤全盐空间变异性与当地修建台田、挖沟降低地下水位等治盐措施相关。

(3)本研究确定最大采样单元为48 hm²,最大采样间距为692 m,在保证一定插值精度的情况下,在本研究区内111个点可以很好地表现有机质的空间分布信息。

参考文献:

- [1] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.
WANG Jia-li, HUANG Xian-jin, ZHONG Tai-yang, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5):673-684. (in Chinese)
- [2] 刘杏梅.基于GIS和地统计学的不同尺度水稻田土壤养分时空变异及其机理研究[D].杭州:浙江大学,2005:76-78.
LIU Xing-mei. Temporal variation and its mechanism of different scale water paddy field of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005:76-78. (in Chinese)
- [3] 肖燕,吕喜军.基于地统计学的河南省封丘县土壤养分空间变异研究[J].水土保持通报,2012,32(4):180-184.
XIAO Yan, LV Xi-jun. Geostatistics-based spatial variability of soil nutrients in Fengqiu County of Henan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(4):180-184. (in Chinese)
- [4] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等.基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J].应用生态学报,2000,11(4):557-563.
GUO Xu-dong, FU Bo-jie, MA Ke-ming, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS: A case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):557-563. (in Chinese)
- [5] 王淑英,路苹,王建立,等.北京市平谷区土壤有机质和全氮的空间变异分析[J].北京农学院学报,2007,22(4):21-25.
WANG Shu-ying, LU Ping, WANG Jian-li, et al. Spatial variance of soil organic matter and total nitrogen in Pinggu of Beijing[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2007, 22(4):21-25. (in Chinese)
- [6] 姚荣江,杨劲松,刘广明,等.黄河三角洲地区典型地块土壤全盐空间变异特征研究[J].农业工程学报,2006,22(6):61-66.
YAO Rong-jiang, YANG Jin-song, LIU Guang-ming, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6):61-66. (in Chinese)
- [7] 周在明,张光辉,王金哲,等.环渤海微咸水区土壤全盐及盐渍化程度的空间格局[J].农业工程学报,2010,26(10):15-20.
ZHOU Zai-ming, ZHANG Guang-hui, WANG Jin-zhe, et al. Spatial pattern of soil salinity and soil salinization in area around Bohai Sea[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):15-20. (in Chinese)
- [8] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1999.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 张朝生,章申,张立成,等.长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究[J].环境科学学报,1995,15(3):257-264.
ZHANG Chao-sheng, ZHANG Shen, ZHANG Li-cheng, et al. Calcula-

- tion of heavy metal contents in sediments of the Changjiang River system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(3):257-264. (in Chinese)
- [11] 齐雁冰, 常庆瑞, 刘梦云, 等. 县域农田土壤养分空间变异及合理样点数确定[J]. 土壤通报, 2014, 45(3):556-561.
QI Yan-bing, CHANG Qing-rui, LIU Meng-yun, et al. County-scale spatial variability of soil nutrient distribution and determination of reasonable sampling density[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3):556-561. (in Chinese)
- [12] 张志霞, 许明祥, 刘 京, 等. 黄土高原不同地貌区土壤有机碳空间变异与合理取样数研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12):2103-2113.
ZHANG Zhi-xia, XU Ming-xiang, LIU Jing, et al. Spatial variation and reasonable sampling number of soil organic carbon under different geomorphic types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12):2103-2113. (in Chinese)
- [13] 海 南, 赵永存, 田 康, 等. 不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4):783-791.
HAI Nan, ZHAO Yong-cun, TIAN Kang, et al. Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):783-791. (in Chinese)
- [14] Utset A, Ruiz M E, Herrera J, et al. A geostatistical method for soil salinity sample site spacing[J]. *Geoderma*, 1998, 86(1/2):143-151.
- [15] Kerry R, Oliver M A. Average variograms to guide soil sampling[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(4):307-325.
- [16] 赵倩倩, 赵庚星, 姜怀龙, 等. 县域土壤养分空间变异特征及合理采样数研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8):1382-1391.
ZHAO Qian-qian, ZHAO Geng-xing, JIANG Huai-long, et al. Study on spatial variability of soil nutrients and reasonable sampling number at county scale[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8):1382-1391. (in Chinese)