

基于地统计学的田块尺度盐碱土特性研究

顾鑫, 杨丽, 任翠梅, 高国金, 孙连成, 刘冰, 孙兴荣, 韩墨

(黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

[关键词] 盐碱土; 土壤 pH 值; 电导率; 空间分异特征; 地统计学

[摘要] 精确掌握盐碱化土壤特性的空间分异情况, 可为盐碱地综合利用、土壤资源可持续利用及生态环境保护提供更加科学的理论依据。为此, 选取东北松嫩平原盐碱化土壤为研究对象, 应用网格法采集田块尺度下盐碱化土壤表层(0~20 cm) 样本, 利用地统计学原理和 GIS 技术, 研究了该田块土壤的电导率、pH 值、容重、孔隙度、含水量及饱和持水量的空间分异特征, 结果表明: 这些指标在统计上均服从正态分布, 在空间上存在明显的分异性; 该田块土壤整体发生轻度盐碱化(土壤电导率为 123.1~316.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$, pH 值为 7.56~8.17), 与地面高处相比, 低洼处的盐碱化程度更强; 土壤 pH 值和含水量的主导影响因素为结构性因素(气候、母质、土壤类型等自然条件), 土壤电导率、容重、孔隙度、饱和持水量的主导影响因素为随机性因素(施肥、灌溉、耕作措施等人为活动)。

[中图分类号] S155.2 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2017)07-0048-04

土壤作为地球上最宝贵的一种自然资源, 是经济社会可持续发展的物质基础, 关系到人类的生存和发展。在干旱、半干旱地区, 土地生产力普遍低下, 土壤常常发生盐碱化, 这已成为全球性的农业生态环境问题。据联合国教科文组织(UNESCO)和粮农组织(FAO)的不完全统计^[1], 全球盐碱化土地面积大约为 9.55 亿 hm^2 , 约占全世界可耕作土地面积的 10%。我国是世界上发生土壤盐碱化较为严重的国家之一, 在黄淮海平原、西北内陆地区、东北松嫩平原及东部滨海地区均有分布^[2], 其中具有农业利用潜力的盐碱化耕地将近 1 330 万 hm^2 , 挖掘潜力相当大^[3]。黑龙江省大庆地区位于东北松嫩平原腹地, 其盐碱化土地面积高达 288 万 hm^2 , 占东北地区盐碱地总面积的 39.3%^[4], 且新开垦土地的不断增长和不合理的灌溉方式, 使盐碱化土地的数量仍在继续增长。盐碱化土壤改良难、利用难, 其形成实质是一定时期一定空间范围多因素作用下土体水盐横向与纵向迁移所致, 土壤特性在空

间分布上并非是均一不变的, 同一时间不同地点存在着明显的分异性^[5]。为此, 摸清盐碱化土壤家底, 精确掌握真实的土壤信息, 对于盐碱地治理与综合利用具有重要的意义。本研究选取东北松嫩平原盐碱化土壤为研究对象, 利用地统计学原理并结合 GIS 技术对土壤特性的空间分异情况进行研究, 从而判断土壤各个特性的主导影响因素, 以期对盐碱地综合利用、土壤资源可持续利用及生态环境保护提供更加科学的理论依据。

1 研究区概况

本研究在黑龙江省农业科学院大庆分院试验基地进行。该基地位于北纬 46°40'、东经 125°14', 坐落于嫩江平原中部, 地形为碟形凹地。属中温带大陆性季风气候, 春季干旱多大风, 夏季高温多雨水, 秋季凉爽且短促, 冬季严寒而漫长; 多年平均气温 3.3 $^{\circ}\text{C}$, 最低气温出现在 1 月, 为 -37.2 $^{\circ}\text{C}$, 最高气温出现在 7 月, 为

增加趋势, 尤其是 2009 年以后增加比较明显。研究区气候特征总体上向暖干化方向发展, 这与全球气候变化大趋势和我国西北地区气候变化的情形一致。在这种气候变化的影响下, 在渭河源区开展水土保持和生态恢复工作将面临更大的挑战。

[作者简介] 王丽洁(1981—), 女, 甘肃渭源县人, 工程师, 主要从事水土保持科学研究工作; 通信作者李永明(1981—), 男, 甘肃通渭县人, 高级工程师, 主要从事水土保持科学研究工作。

[收稿日期] 2017-03-15

(责任编辑 李杨杨)

38.3 ℃;多年平均降水量为 426 mm,多年平均水面蒸发量为 972 mm,最大冻土深度 2.14 m。土壤季节性发生盐碱化,土壤积盐—脱盐过程交替出现,土体中盐分的迁移与地下水位关系密切。选取一典型田间地块作为本研究的调查对象,田块面积约 5 hm²。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集方法

于 2016 年 4 月中旬采用网格法对研究区典型田间地块土壤进行采样。采样时将该地块等间距打成 40 m×40 m 大小的网格,然后在网格内按梅花形采集 5 钻土壤(采样深度为 0~20 cm)组成代表该点的混合样本,并利用 GPS 定位仪精确记录采样点的地理位置信息。共采集样本 26 个。

2.2 土壤特性测定方法^[6]

土壤 pH 值测定采用电位法(1:2.5 土水比,IS139 实验室 pH 计);土壤电导率(Electrical Conductivity, EC)值测定采用电导率仪(型号 DDS-307);土壤含水量测定采用经典铝盒烘干法;土壤容重及饱和持水量测定采用经典环刀法。

2.3 地统计学理论

地统计学理论是地质矿产部门在探矿和采矿时采用的一种先进空间分异分析方法,可用于土壤特性空间分异研究的定量分析^[7]。该方法主要是利用原始数据和半方差函数的结构性,对未知样点的区域化变量进行无偏估值,理论基础是变差图理论和区域变量理论。地统计学理论在研究土壤特性空间变异中取得了相当大的成功,并得到了广泛应用^[8]。在地统计学方法中,半方差函数是用于研究土壤特性空间分异结构的一个关键函数,该函数的形式^[9]为

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

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数,它等于所有以给定间距 h 相隔的样点的观测值之差平方的数学期望; $N(h)$ 为以 h 为间距分隔的所有观测样点的成对数目,当样点总数为 n 时, $N(h) = n-1$; $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i+h)$ 为以 h 为间距的两个实测值。

通常,半方差函数反映了不同间距观测值之间的变化, $\gamma(h)$ 值随着样点间距 h 的增加而增大,当间距 h 上升到最大时, $\gamma(h)$ 值趋于稳定。

实际上,土壤的性质在空间上是连续变化的,所以土壤性质的半方差函数应该是连续函数。但是,样品半方差图却是由一批间断点组成的,可以用直线或曲

线将这些点连接起来,用于拟合的曲线方程就称为半方差函数的理论模型。地统计学中有多种半方差函数理论模型,其中应用最广的理论模型是有基台值的球状模型,该模型能用于各种沉积矿物、土壤和水的空间变异性研究。球状模型^[10]为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_0 为间距为 0 时的半方差,称为块金常数,表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异; C_0+C 为半方差函数随着间距递增到一定程度后出现的稳定值,称为基台值,表示系统内的总变异; C 为基台值与块金常数的差值; a 为半方差达到基台值时的样本间距,称为变程。

Kriging 空间插值分析是地统计学方法中最常见的空间局部内插法^[11],它是以变异函数理论和结构分析为基础,根据有限区域内的若干已知样点数据,对未知样点值进行的一种线性无偏最优估计。对于任意待估点,其估计值是通过 n 个该待估点影响范围内的有效样点值的线性组合得到,是建立在半变异函数理论分析基础上的加权平均估计,公式为

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

式中: $Z(x)$ 为待估点的估计值; $Z(x_i)$ 为待估点影响范围内的某个有效样点值; λ_i 为权重系数, $\sum \lambda_i = 1$ 。

2.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,利用 SPSS 19.0 和 ArcGIS 9.3 进行地统计分析及土壤特性空间分异图绘制。

3 结果与分析

3.1 土壤特性的统计特征分析

研究区土壤各指标的统计特征见表 1。土壤电导率能够影响土壤养分及污染物的转化和有效性,反映了在一定条件下土壤盐分的实际状况,与土壤盐分呈现正相关,因此常用电导率来估测土壤的含盐量^[12]。由表 1 可知,该田块土壤电导率在 123.1~316.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间,平均值为 192.58 $\mu\text{s}/\text{cm}$,表明该田块土壤整体上发生轻度盐化;该田块土壤 pH 值在 7.56~8.17 之间,平均值为 7.92,表明该田块土壤整体呈轻度碱化;该田块土壤容重和孔隙度的平均值分别为 1.20 g/cm^3 和 54.83%,表明土壤熟化程度较高;土壤含水量和饱和

表 1 表层(0~20 cm)土壤特性统计特征

分析指标	样点数量(个)	极小值	极大值	平均值	标准方差	偏度	峰度	中值	变异系数 C_v (%)
电导率($\mu\text{s}/\text{cm}$)	26	123.10	316.00	192.58	50.72	0.62	2.70	189.35	26.34
pH 值	26	7.56	8.17	7.92	0.16	-0.50	2.36	7.93	2.02
容重(g/cm^3)	26	1.00	1.50	1.20	0.12	0.55	2.92	1.19	10.00
孔隙度(%)	26	43.40	62.27	54.83	4.65	-0.55	2.92	55.28	8.48
含水量(%)	26	7.27	22.03	14.13	3.40	0.19	2.99	14.18	24.06
饱和持水量(%)	26	26.67	53.00	37.70	5.85	0.36	3.46	38.14	15.52

持水量平均值分别为 14.13% 和 37.70%，体现了土壤的保水、持水能力较强。从变异系数 C_v 来看，该田块土壤 pH 值、容重、孔隙度属于弱变异 ($C_v \leq 10\%$)，土壤电导率、含水量、饱和持水量属于中等变异 ($10\% < C_v \leq 100\%$)^[13]。

土壤电导率、pH 值、容重、孔隙度、含水量及饱和持水量的偏度系数接近于 0，峰度系数接近于 3 (表 1)，经 K-S 检验 (表 2)，各个指标的检验 P 值均大于 0.05，表明数据均呈近正态分布，满足半方差函数分析使用的要求^[14]。

表 2 表层(0~20 cm)土壤特性 K-S 检验

分析指标	检验统计量 Z 值	P 值(双侧)
电导率	0.629	0.824
pH 值	0.656	0.782
容重	0.465	0.982
孔隙度	0.465	0.982
含水量	0.503	0.962
饱和持水量	0.650	0.791

3.2 土壤特性的半方差函数分析

经半方差函数分析，获得研究区土壤各指标的半方差参数，见表 3。土壤各指标特性基台值 (C_0+C) 在 0.151~1.419 之间，表现为具有明显的空间结构。该研究区土壤各指标特性的变程在 1.671~3.807 m 之间。块基比 $C_0/(C_0+C)$ 的大小反映了系统变量的空间相关性，其比值越小空间相关性就越强，同时该比值的大小也能反映出引起空间变异的主导影响因素，比值较高说明是由随机因素引起的空间变异占主要部分，比值较低说明是由空间结构因素引起的变异占主要部分^[15]。由表 3 可以看出，该田块土壤 pH 值和含

表 3 表层(0~20 cm)土壤特性半方差参数

分析指标	理论模型	块金常数 C_0	基台值 C_0+C	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程 a (m)
电导率	球状模型	0.118	0.157	0.752	1.671
pH 值	球状模型	0.025	0.297	0.084	2.214
容重	球状模型	0.893	1.057	0.845	3.807
孔隙度	球状模型	0.127	0.151	0.841	3.807
含水量	球状模型	0.319	1.419	0.225	3.807
饱和持水量	球状模型	0.213	0.218	0.977	3.807

水量的空间相关性较强， $C_0/(C_0+C) < 0.25$ ，土壤 pH 值和含水量受结构性因素 (气候、母质、土壤类型等自然条件) 影响强烈；土壤电导率、容重、孔隙度、饱和持水量的空间相关性较弱， $C_0/(C_0+C) > 0.75$ ，受随机性因素 (施肥、耕作措施等人为活动) 影响强烈。

3.3 土壤特性的空间插值分析

根据半方差函数分析结果，运用 Kriging 插值方法对实际采样点数据进行空间最优内插，精确获得该研究区土壤各个特性的空间分异情况，见图 1。从图 1 可以看出，土壤电导率在田块中心处较低 (123.1~137.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$)，逐渐向四周扩增变大，西部最大 (270.1~316.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$)，而从田块实际微地形上来看，该地块中心处比周围要高一些，这说明低洼处更容易聚集盐分，发生盐化；土壤 pH 值在 7.56~8.17 之间，说明土壤发生弱碱化，碱化较重处发生在田块西南处；土壤容重和孔隙度也表现出明显的空间分异性，容重大小在 1.00~1.50 g/cm^3 之间，由东北向西南逐渐递减，孔隙度则恰好相反，由东北向西南逐渐递增，大小在 43.4%~62.3% 之间，表明该田块土壤熟化程度由东北向西南逐渐增加；饱和持水量和土壤含水量在空间上也表现出明显的分异性，饱和持水量在 26.7%~53.0% 之间，整体上由西北向东南逐渐递减，含水量在 7.3%~22.0% 之间，与饱和持水量保持基本一致的空间变化规律，但最低土壤含水量发生在田块地面较高处，总体上，田块西北土壤水分比东南充沛，蓄水保水能力较强。土壤特性的空间分异不仅与自然条件有关，同时也受人为因素 (施肥、灌水、耕作等) 的强烈影响。由表 3 数据可知，该田块土壤 pH 值和含水量受自然因素影响强烈，其他土壤指标受人为因素影响强烈。为此，采取合理的农田管理措施，平整土地，填平局部低洼处，能够降低土壤的盐碱危害，使其地力有所提高。

4 结 论

通过利用地统计学原理和 GIS 技术对田块尺度下土壤电导率、pH 值、容重、孔隙度、含水量及饱和持水量等特性进行分析，摸清楚了土壤空间特性的准确信

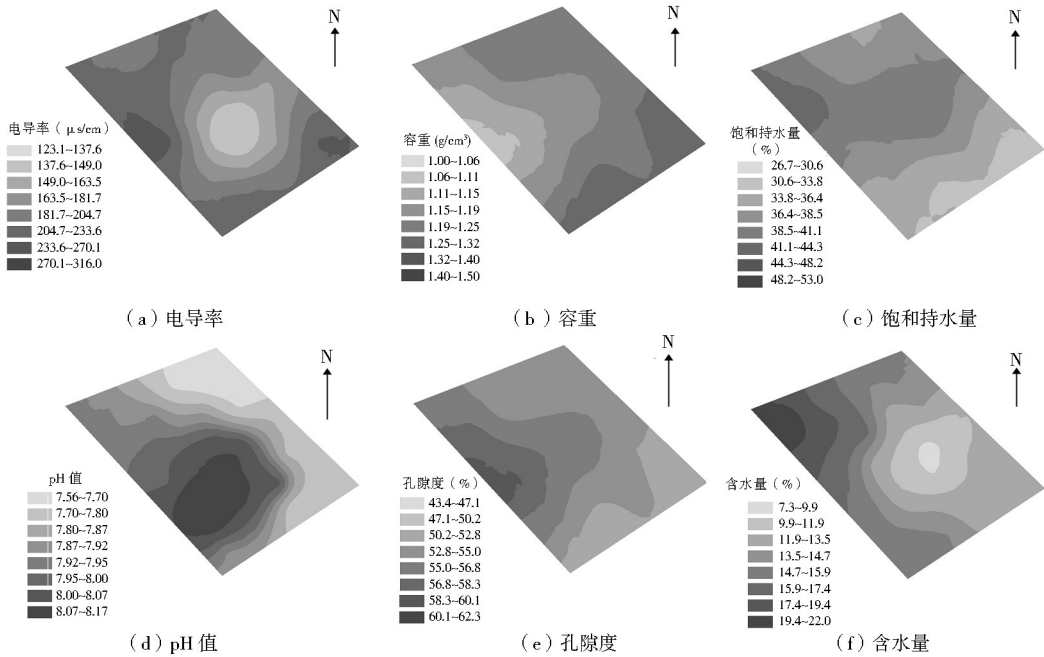


图1 表层(0~20 cm)土壤特性空间分异情况

息,得出以下结论:土壤各个特性在统计上均服从正态分布,在空间上存在明显的分异性;该田块土壤整体发生轻度盐碱化(土壤电导率为 123.1~316.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$, pH 值为 7.56~8.17),与地面高处相比,低洼处的盐碱性更强;土壤 pH 值和含水量的主导影响因素为结构性因素(气候、母质、土壤类型等自然条件),土壤电导率、容重、孔隙度、饱和持水量的主导影响因素为随机性因素(施肥、灌溉、耕作措施等人为活动)。

[参考文献]

- [1] QADIR M, TUBEILEH A, AKHTAR J, et al. Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification[J]. *Land Degradation & Development*, 2008, 19(4): 429-453.
- [2] 吴雪梅,塔西甫拉提·特依拜,姜红涛,等.基于 CCA 方法的于田绿洲土壤盐分特征研究[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1568-1575.
- [3] 徐鹏程,冷翔鹏,刘更森,等.盐碱土改良利用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 293-298.
- [4] 刘东兴,宫伟光.大庆盐碱地立地质量评价[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(3): 98-103.
- [5] 张勇,陈效民,杜臻杰,等.典型红壤区田间尺度下土壤养分和水分的空间变异研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 7-12.
- [6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2005: 14-24, 183-187.
- [7] 孙波,赵其国,闫国年.低丘红壤肥力的时空变异[J]. *土壤*

学报, 2002, 39(2): 190-198.

- [8] 焦金鱼, 贵立德, 贾国江.基于熵技术的半干旱地区土壤水分差异性分析[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 826-831.
- [9] 苗正红, 邱中军, 毕强, 等.基于半变异函数的土壤有机碳空间预测方法[J]. *地理空间信息*, 2015, 13(6): 68-70.
- [10] 祝锦霞, 徐保根, 章琳云.基于半方差函数与等别的耕地质量监测样点优化布设方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 254-261.
- [11] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社, 2006: 363-422.
- [12] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 等.采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 869-873.
- [13] 刘欣, 王红梅, 廖丽君.黑龙江省巴彦县土壤养分空间变异规律与格局分析[J]. *土壤通报*, 2011(1): 86-90.
- [14] 王水献, 王云智, 董新光, 等.开孔河流域浅层地下水矿化度时空变异及特征分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 293-296.
- [15] 杨文, 周脚根, 焦军霞, 等.亚热带丘陵小流域土壤有效磷空间变异与淋失风险研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 541-549.

[作者简介] 顾鑫(1988—),男,黑龙江讷河市人,硕士,主要从事土壤改良与土壤生态方面的研究工作。

[收稿日期] 2016-08-14

(责任编辑 徐素霞)