

松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与 微地形关系研究

杨 帆^{1,2}, 章光新¹, 尹雄锐¹, 李秀军¹

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以松嫩平原西部具有典型微地形变化的苏打盐渍土小区为试验区,运用经典统计学和地统计学相结合的方法研究了小区盐碱化指标土壤电导率(EC)、盐分含量(SC)、pH和SAR的空间变异特征,绘制了4种指标的空间分布图。结果表明:受结构性因素和随机性因素的共同作用,4种指标均具有强空间相关性。4种指标空间分布在一定范围内均存在空间上的相似性。四种指标与相对高程呈极显著相关,相对高程在40cm范围内,四种指标随着相对高程的增加,呈二次函数曲线增加趋势。该研究为苏打盐渍土区植被恢复和盐碱地利用提供依据。

关键词:苏打盐渍土;地统计;空间变异;微地形

中图分类号:S152 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2009)06-0869-05

松嫩平原是世界上三大片苏打盐渍土的集中分布区之一,其生态环境脆弱,是中国北方土地荒漠化最严重的地区之一。该区盐碱化土地面积约为342万 hm^2 ,占土地总面积的20%,并且重度盐碱化面积仍以每年1.4%的速度扩展^[1,2]。盐碱化程度不断加剧,造成了大片粮田产量下降和草地退化。由于松嫩平原中、小、微地形的普遍存在,土壤含盐量在很小区域范围内往往差异很大,一般的野外调查和土壤制图很难把他们单独区分开来。不同盐碱化程度的盐渍土镶嵌分布,相伴共存,形成盐渍土复区,是松嫩平原盐渍土存在的主要方式。土壤盐分含量的这种不均匀性是本区盐渍土最为普遍、最为突出的特点之一,它给盐渍化土壤的大面积开发利用和生态重建及可持续发展带来诸多不便和困难^[3]。因此研究土壤盐碱化空间变异及其与微地形的关系对于盐碱土的开发和利用有着重要意义。

地统计学于20世纪80年代应用于土壤科学中,探索其空间分布特征及其变异规律,现已为越来越多的学者所推崇^[4]。由于土壤盐分数据具有空间结构性和随机性的特点^[5,6],地统计学研究其空间分异是有效的方法^[7]。中国学者就盐分空间

变异方面在不同区域作了大量工作,取得了满意的结果^[8-10]。然而在苏打盐渍土区,盐碱化空间变异特征研究仍然很少。以往的研究多处于定性的描述或经典的统计分析,而未作定量地描述和解释空间异质性^[11]。因此本文以松嫩平原西部具有微地形地貌特征的盐渍土复区作为样地,用地统计学方法定量地描述小区土壤盐碱化指标空间异质性,建立空间预测模型,进行空间数据插值和有效的估计,并将盐碱化空间格局与微地形联系起来,更深刻地研究土壤盐碱化空间变异机制,为松嫩平原西部盐碱地植被恢复和环境建设提供基础数据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院大安碱地生态试验站进行,地理坐标为东经 $123^{\circ}50'27''\sim 123^{\circ}51'31''$,北纬 $45^{\circ}35'58''\sim 45^{\circ}36'28''$ 。该区多年平均降水量413.7mm,年均蒸发量为1696.9mm。试验站周围地区属嫩江古河道低漫滩,不同盐碱化程度的盐渍土镶嵌分布,相伴共存,是松嫩平原典型盐渍土复区。

1.2 方法与试验设计

选择具有微地形变化特征的不同盐碱化程度

收稿日期:2008-12-18 修订日期:2009-04-16

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-Q06-2)(KZCX1-YW-126),国家十一五攻关项目(2006BAC01A08),东北地理与农业生态研究所领域前沿项目(KZCX3-SW-NA3-29)联合资助。

作者简介:杨帆(1972-),女,吉林长春人,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为水盐运移及生态效应。E-mail:yangfan@neigae.ac.cn

通信作者:章光新,研究员,博士生导师。E-mail:Zhgc@neigae.ac.cn

盐渍土小区为研究样地。试验小区南北长 100 m, 东西宽 100 m, 面积为 10 000 m²。小区内不同高程的小丘和洼地镶嵌分布, 最大相对高差为 36.3 cm。从微域尺度上看, 满足了区域盐碱土复合镶嵌体重复出现的空间要求, 具有典型代表性。将小区分成 10 m × 10 m 的网格, 使样点在试区内合理散布的原则下, 共布置了 40 个测试点 (图 1)。试验从 2005 年 9 月开始到 2007 年 9 月结束。分析数据为 3 年的平均值。

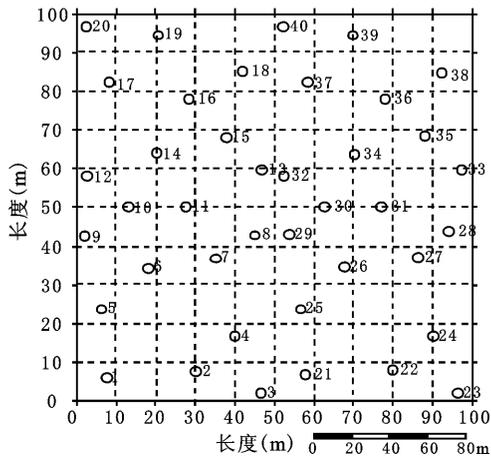


图 1 试验小区测量点布置图

Fig. 1 Distribution of measuring points in the experiment site

1.3 样品采集与测试方法

土壤水溶性盐测定: 试验小区各测点分别取样, 取样深度为 0~10 cm, 每个样点取三个土样, 将其混合, 作为待试样品。土样在室内自然风干,

过 1mm 筛后, 采用 1:5 土水比例浸提水溶性盐。浸提液在实验室做水溶性盐分析, 分析项目包括: pH、EC、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 等主要离子含量。Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 离子采用原子吸收分光光度法测量, CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 离子采用双指示剂-中和滴定法测量, Cl⁻ 离子采用硝酸银滴定法测量, SO₄²⁻ 离子采用硫酸钡比浊法测量。钠吸附比 (SAR) 是土壤溶液中钠含量的主要参数, 反映了钠离子和钙镁离子的相对数量。土壤浸提液钠吸附比 (SAR) 采用下式计算:

$$SAR = \frac{[Na^{2+}]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}} \quad (1)$$

式中, Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的浓度单位为 mmol/l

相对高程: 采用 DSN232 型水准仪测量。

2 结果与分析

2.1 土壤盐碱化指标统计特征值

本试验以反映土壤盐碱化程度的 4 种重要指标加以研究, 四种指标分别为电导率 (EC)、盐分含量 (SC)、pH、SAR。由表 1 可知, EC、SAR 变异系数均超过 1, 具有显著的空间变异性。SC 较 EC、SAR 变异系数稍小为 0.71, 同样具有显著的空间变异性。pH 空间变异系数最小为 0.05, 属于弱空间变异。然而 pH 最小值为 8.06, 最大值为 10.73, 小区内 pH 分布也符合轻度→中度→重度的空间镶嵌分布特征。三年均值为 9.63, 说明该小区土壤碱化程度较高。

表 1 盐碱化指标统计特征值

Table 1 Statistical feature values of index of saline alkali soil

盐碱化指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型	K-S
pH	8.06	10.73	9.63	0.68	0.07	-0.202	-0.975	正态	0.121
EC (us/cm)	94.70	3405.6	484.2	538.1	1.11	4.447	23.127	对数正态	0.907
SC (mg/kg)	894.5	16712.6	5658.5	4031.6	0.71	0.728	-0.155	对数正态	0.759
SAR	3.76	76.03	9.14	12.2	1.33	4.377	24.4	对数正态	0.155

检验数据的正态分布是使用空间统计学 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提, 只有当数据服从正态分布时, Kriging 方法才有效, 否则可能存在比例效应^[12]。通过 Kolmogorov-Smirnov 法进行正态检验, pH 符合正态分布, EC、SAR、SC 符合对数正态分布, 土壤四种盐碱化指标均满足地统计学分析的要求。

2.2 土壤盐碱化指标空间结构分析

半方差函数的理论模型及参数确定可参考文献^[13]。由表 2 可知, 四种指标的最优模型均为球状模型。块金常数反映了区域化变量内部随机性的可能程度, 四种指标块金常数非常小, 可认为他们在小区范围内的取样间距已经比较合理, 分析过程中几乎没有误差存在。

表 2 土壤盐碱化指标半方差模型及其参数值

Table 2 Theoretical semivariogram parameters for index of saline-alkali soil

项目	理论模型	块金值	基台值	变程 (m)	块金/基台	决定系数	残差平方和	分维数
pH	球状	1.000E-005	4.700E-003	53.4	0.002	0.969	6.647E-07	1.537
EC	球状	1.000E-005	1.072E-002	79.9	0.001	0.965	3.866E-06	1.194
SC	球状	0.001	0.753	57.1	0.001	0.906	0.047	1.324
SAR	球状	0.0001	0.3152	62.2	0.001	0.870	0.011	1.636

块金方差与基台值之比 (即 $C_0/(c+C_0)$) 可表示空间变异性程度, 如果该比值较高, 说明由随机部分引起的空间变异程度较大; 相反, 则由空间自相关部分引起的空间变异程度比较大; 如果该比值接近于 1, 则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素的角度来看, $C_0/(c+C_0)$ 的比例可以表示系统变量的空间相关性程度, 如果比例 $< 25\%$, 说明变量具有强烈空间相关性; 在 $25\% \sim 75\%$ 之间, 变量具有中等的空间相关性; $> 75\%$ 时变量空间相关性很弱^[14]。由表 2 可知, 4 种指标的 $C_0/(C+C_0)$ 均小于 25% , 具有强烈的空间相关性, 即 4 种指标的空间变异主要是由微地形和气候等结构性因素影响形成的。

变程反映了区域化变量的空间自相关范围的大小。由于变程联系着最大相关距离的大小 (参考于理论模型), 表示土壤盐碱指标观测值之间的距离大于该值时则样本相互独立, 小于该值时则样本存在一定的相关关系。由表 2 可知, 土壤盐碱化指标自相关范围不同, 4 种指标自相关范围表现为 $EC > SAR > SC > pH$ 。由此说明盐碱化指标的空间自相关变化的尺度存在一定的差异。样点间的距离在 79.9 m 以内 EC 空间变异是由结构性因素引起的。pH 两样点的距离在 53.4 m 范围内是由结构性因素引起的。而其它两种指标的自相关尺度介于其间。在苏打盐渍土区, 由于盐碱化指标受微地形的影响程度有所不同, 因此其空间自相关范围不尽相同。

分形维数 D 值大小可以衡量对象空间异质性 (结构复杂性) 的程度, 其随步长的变化可进一步反映空间异质性随空间尺度变化的特征^[15]。由表 2 可知, 4 种指标分维数比较为 $SAR > pH > SC > EC$ 。EC、SC 分形维数小, 由空间自相关部分引起的空间异质性高。而 pH、SAR 分形维数稍大, 较其它两种指标, 由空间自相关部分引起的空间异质性稍低。因此土壤盐化指标较碱化指标具有更强的空间自相关。

2.3 土壤盐碱化指标的空间分布特征

为了更直观地反映试验区土壤盐碱化的空间分布情况, 根据半方差函数模型, 利用 Kriging 最优内插法, 绘制了等值线图 (图 2), 分别对表层土壤盐碱化性质的空间分布特征进行具体分析。

小区内盐化指标 (EC、SC) 在空间分布上均呈斑块状或条带状镶嵌分布, 盐化指标空间分布特征为以 2、3、4 样点为中心的高盐化指标斑块, 以 17、19、20 样点为中心的次高盐化指标斑块, 以 34、36、37 样点为中心和以 1、5、6 样点为中心的低盐化指标斑块。盐化指标具有明显的空间相似性。在地貌相对高程最高处 3 点, EC、SC 均为最大值。随着地貌高程的降低, 盐化指标相应减小。由图可知, 碱化指标 (pH、SAR) 和盐化指标具有相同的空间分布特征。随着土壤盐分的增加, 土壤碱化程度加重。

2.4 土壤盐碱化指标与微地形的关系

为了进一步证实微地形是土壤盐碱化空间变异的重要因子, 对盐碱化指标和相对高程做进一步分析。由表 4 可知, 相对高程 (H) 与盐碱化 4 种指标均呈极显著相关 ($P < 0.01$)。由此确定微地形是该区土壤盐渍化形成的重要因素之一。

分析原因, 在相对高起的微地形上, 同时存在着纵向和横向两个方面的湿度差。根据土壤毛管水由湿度大的土层向湿度小的土层移动规律, 微高地上既有毛管上升水流的补给, 也有毛管侧向水流的补给, 当水分沿土壤毛细管由下而上, 由缓坡低处向缓坡高处移动过程中, 盐分也随之迁移, 并通过蒸发而表聚。蒸发量愈大, 水分的补给愈快, 盐分积累也愈多^[16], 因此试验小区在微高地处土壤盐化指标明显高于低地。同时在微高地处, 由于土壤在积盐和脱盐的频繁交替过程中, 促进了土壤溶液中盐类离子和土壤胶体表面所吸附的阳离子之间的交换, 加快了土壤碱化过程的速度, 并增加了土壤碱化强度^[15]。因此苏打盐渍土区盐化与碱化相伴而生。

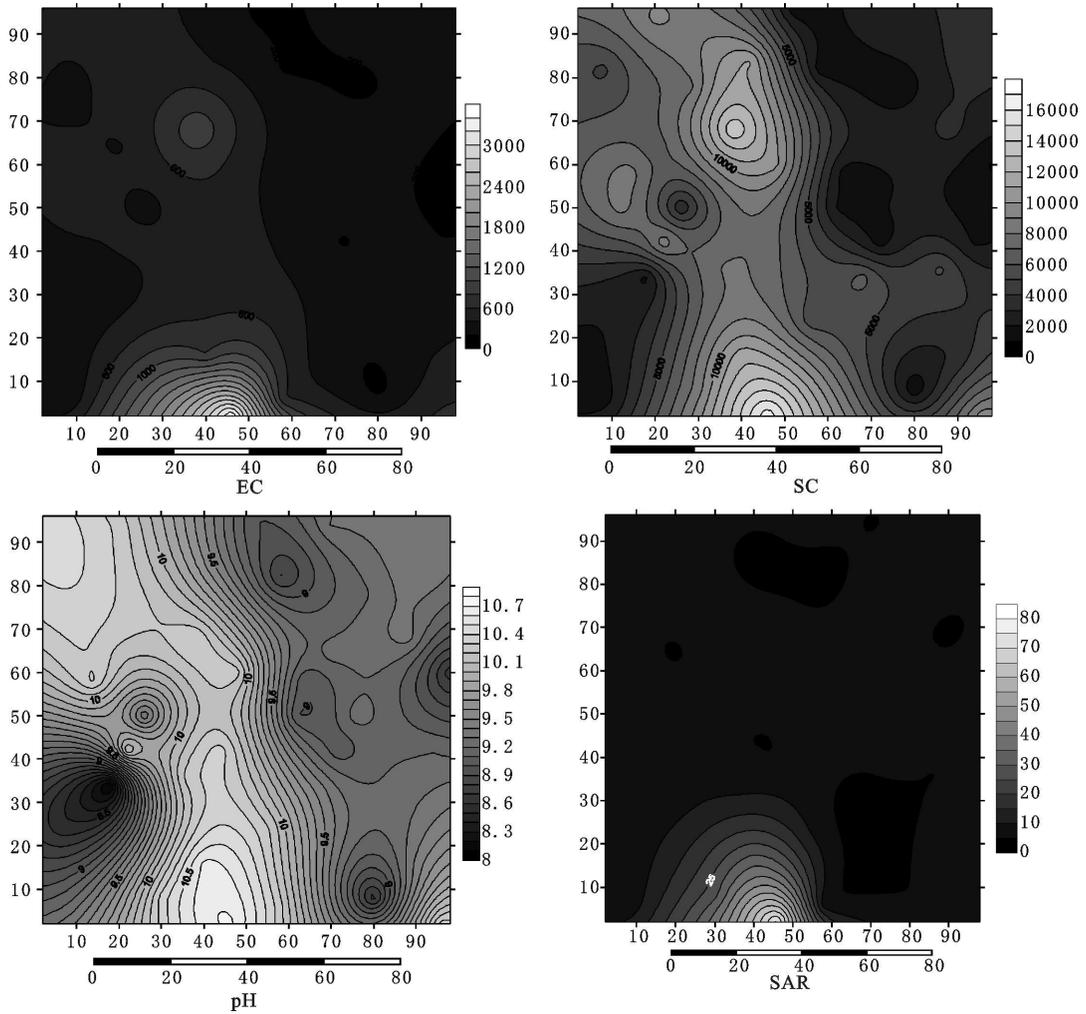


图 2 土壤盐碱化指标空间分布图

Fig 2 Maps of kriging estimations of index of saline-alkali soil

表 4 土壤盐碱化指标与相对高程的相关分析

Table 4 Pearson analysis between relative height and index of saline-alkali soil

	H	EC	pH	Na ⁺	SC
H	1				
EC	0.782**	1			
pH	0.592**	0.565**	1		
Na ⁺	0.809**	0.955**	0.627**	1	
SC	0.665**	0.716**	0.832**	0.766**	1

由表 5 可知, 盐碱化指标与相对高程回归模型均为二次函数 $Y = aX^2 + bx + c$, 且四个模型都通过了 F 检验, 达到了极显著水平, 模型具有可靠性。EC、SAR 规律相似, 在高程 0~10 cm 之间随着高程增长呈微弱增长, 相对高程在 10~20 cm 时较 0~10 cm 积盐速度增加, 在 20~40 cm 之间呈急速增加阶段。而 pH、SC 在整个过程呈稳步增加趋势, SC 随相对高程增加速度要快于 pH。因此在

土壤盐渍化治理过程中, 消除土壤微域结构, 尤其对于相对高程在 20~40 cm 之间的微地形, 使土壤均匀化, 是恢复植被和治理盐渍化的重要策略。

表 5 土壤盐碱化指标与相对高程回归模型

Table 5 Regression model between relative height and index of saline-alkali soil

回归模型	相关系数 R ²
EC = 3.1626H ² - 34.1H + 355.86	0.896
SC = 3.7498H ² + 260.33H + 2559.5	0.451
SAR = 0.0882H ² - 1.3861H + 9.7633	0.915
pH = -0.0009H ² + 0.0813H + 8.9552	0.365

3 结 论

1) 土壤盐碱化指标中 EC、SC、SAR 变异系数范围为 0.71~1.33 为强空间变异。而 pH 的变异系数为 0.02 为弱空间变异。4 种盐碱化指标在一

定的区域范围内具有高度空间相关性,均符合球状模型。说明土壤盐碱化空间变异主要由微地形和气候等结构性因素影响形成的。

2) 土壤表层盐碱化指标空间分布均表现为条带状和斑块状格局,各空间分布图存在着较强的空间相似性。空间分布表现为地势高处盐分含量高,碱化程度重的规律,说明苏打盐渍土区土壤盐化的同时伴随着碱化,盐化指标较碱化指标与微地形具有更强的相关性。

3) 土壤四种盐碱化指标与相对高程均呈显著性相关,回归模型均为二次函数。说明微地形是土壤盐渍化形成的重要因素。因此在土壤盐渍化治理过程中,消除土壤微域结构,尤其是相对高程在20~40cm之间的微地形,使土壤均一化,是恢复植被和治理盐渍化的重要策略。

参考文献:

- [1] 李取生, 裴善文, 邓伟. 松嫩平原土地次生盐碱化研究[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 268~272
- [2] 刘殿伟, 宋开山, 王丹丹, 等. 近50年来松嫩平原西部土地利用变化及驱动力分析[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 277~283.
- [3] 刘兴土. 松嫩平原退化土地整治与农业发展[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 辛厚文. 分形论及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993
- [5] Tanji K K. A conceptual hydro salinity model for predicting sal local in irrigation return flow [J]. Managing Saline Water for Irrigation, 1997, 14: 49~65
- [6] Webster R., Oliver M A. Stat Methods in Soil and Land Resource Survey [M]. Oxford University Press, 1990.
- [7] 宋新山, 邓伟, 何岩, 等. 土壤盐分空间分异研究方法及展望[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 250~254
- [8] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法[J]. 中国农业大学学报, 2000, 33(5): 59~66
- [9] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 348~353.
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61~66
- [11] 杨建锋, 邓伟, 章光新. 田块尺度苏打盐渍土盐化和碱化空间变异特征[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 500~505
- [12] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651~657
- [13] 王政权. 地统计学在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [14] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Sci Soc Am. J., 1994, 58: 1501~1511.
- [15] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 514~520
- [16] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993

Spatial Variability of Soil Salinity and Alkalization and Its Correlation with Micro-topography in the West of Songnen Plain

YANG Fan^{1,2}, ZHANG Guang-xin^{1*}, YIN Xiong-rui¹, LI Xi-jun¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Soil salinity content (SC), electrical conductivity (EC), pH, SAR were studied and analyzed by using statistics and geo-statistics in saline-sodic soil land in the West of Songnen Plain. The result indicated SC, EC, SAR, pH were strongly spatial autocorrelation resulting from compound impact of structural factors. The spatial distribution maps of interpolated by Kriging interpolation showed apparently that the spatial distribution of SC, EC, SAR and pH were similar. Through Pearson correlation, the result showed four indexes of salinity and alkalization were significant correlation with relative height. With increasing of relative height, four indexes were increased based curve of quadratic objective function. So salinity and alkalization was mostly controlled by micro-topography in saline-alkali land. The research results can serve as a theoretical and technical basis for vegetation restoration and utilization of saline soils in the saline-alkali land.

Key words saline-alkali land; geostatistic; spatial variability; micro-topography