

退化盐沼湿地盐碱化空间变异与芦苇群落的演替关系

杨 帆^{1,2}, 章光新^{1,*}, 尹雄锐¹, 顾 斌¹, 孙广友¹

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

摘要:以苏打盐渍土区典型退化湿地为研究区,运用经典统计学和地统计学相结合的方法研究了退化湿地盐碱化指标:土壤电导率(EC)、盐分含量(SC)、 pH 和钠吸附比(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, EC 、 pH 、 SC 具有强空间相关性, SAR 空间相关性不明显。Kriging插值结果表明: EC 、 pH 、 SC 空间分布在一定范围内均存在空间上的相似性。盐碱化指标与芦苇生长指标相关分析结果表明: EC 与株高、覆盖度、生物量都呈显著性相关,因此在盐碱化指标中 EC 是影响芦苇生长最重要因素。当 $pH > 10.1$ 、 $EC > 0.4 \text{ mS cm}^{-1}$ 、 $SC > 4604 \text{ mg kg}^{-1}$ 时,植被由芦苇群落过渡为碱茅+芦苇群落,且随着盐碱化指标升高,芦苇所占比例减小。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; 盐沼湿地; 空间变异; 芦苇群落

文章编号:1000-0933(2009)10-5291-08 中图分类号:Q142, Q145, Q948 文献标识码:A

Spatial variability of soil salinity and sodicity and its correlation with the succession of *Phragmites Australis* community in degraded salt marsh

YANG Fan^{1,2}, ZHANG Guang-Xin^{1,*}, YIN Xiong-Rui¹, GU Bin¹, SUN Guang-You¹

1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5291 ~ 5298.

Abstract: The spatial variability of soil salt content (SC), electrical conductivity (EC), pH and sodium adsorption ratio (SAR) was analyzed by using traditional statistics and geo-statistics in a typical degraded wetland of saline sodic soils. The results indicated that SC , EC and pH were strong, while SAR was weak, spatial autocorrelation resulting from compound impact of structural and stochastic factors. Kriging interpolation showed that the spatial distribution of SC , EC and pH was similar. There was a significantly negative correlation between EC and plant height, coverage and dry biomass of *Phragmites Australis*. It indicated that the soil EC was the most important factor affecting the growth of *Phragmites Australis* in saline-sodic land. When $pH > 10.1$, $EC > 0.4 \text{ mS cm}^{-1}$ and $SC > 4604 \text{ mg kg}^{-1}$, the vegetation community was succeeded from *Phragmites Australis* to *Puccinellia distans* + *Phragmites Australis*, and the *Phragmites Australis* plants was decreased with the increase of soil salinity and sodicity. These results may serve for the restoration and utilization of saline-sodic land.

Key Words: saline-sodic soil; salt marsh; spatial variability; *Phragmites australis*; community

松嫩平原西部是我国内陆盐碱湿地集中分布地区,该区盐碱湿地面积约 57.8 万 hm^2 ,并且以每年 1% ~ 2% 的惊人速度在增加^[1,2]。特别是近几十年来,由于气候不断变暖,人类活动加剧,如盲目开垦、过渡放牧以及不合理水利工程等带来的负面效应,不仅使盐碱化程度整体上加重,而且盐碱化面积不断扩大。目前该区

基金项目:中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX2-YW-Q06-2; KZCX1-YW-126); 国家“十一五”攻关资助项目(2006BAC01A08); 东北地理与农业生态研究所领域前沿资助项目(KZCX3-SW-NA3-29)

收稿日期:2008-11-11; 修订日期:2009-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhgx@neigae.ac.cn

三分之二以上的沼泽湿地发生次生盐渍化。区域生态环境不断恶化,严重威胁该区的生态安全和农牧业经济的发展。芦苇(*Phragmites Australis*)群落是该区主要植物群落之一,具有较高的生态和经济价值,在维持湿地生态系统平衡和物种多样性方面起着重要作用^[3]。沼泽湿地次生盐渍化的加重,使芦苇生境土壤的盐渍化程度由轻或轻-中度向中-重度转化,作为这种变化的响应,芦苇群落的类型,也必然发生相应的演替^[4]。因此,研究沼泽湿地退化过程中土壤盐碱化空间格局变异导致芦苇群落演替的制约关系,对该区退化植被的恢复和盐碱地资源的合理利用,都具有重要意义。

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^[5]。由于土壤盐分数据具有空间结构性和随机性的特点^[6,7],用地统计学研究其空间分异是有效的方法。同时地统计学可解释土壤盐分的空间分异特征,以指导人们对土壤盐渍化进行防治^[8]。我国学者在盐分空间变异方面作了一些研究,得到了满意的结果^[9-11]。在苏打盐渍土区,研究土壤盐碱化指标空间变异取得了一些成果^[12],但在盐碱化指标空间变异与芦苇群落演替关系方面研究较少^[13],而且利用地统计学研究退化碱性湿地盐碱化指标空间分异特征与芦苇群落演替驱动值的确定未见报道。

本文以松嫩平原西部退化盐碱湿地作为样地,用地统计方法研究土壤盐碱化指标空间变异,并分析了土壤盐碱化指标与芦苇群落关系,为松嫩平原西部盐碱地植被恢复和环境保护提供依据。

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°50'27"~123°51'31",北纬 45°35'58"~45°36'28"。该区属中温带大陆季风气候,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,已有研究表明,松嫩平原西部全新世古河道是区域湿地的主体,目前的演替方向是由中-轻度盐碱湿地向中-重度盐碱湿地转化,即处于退化过程中。同时退化湿地导致芦苇群落的退化,表现为植株矮生化和种盖度降低等。而且区内轻、中、重度盐碱湿地土壤呈现的复合镶嵌格局,也导致不同类型的芦苇群落呈现复合镶嵌的分布特征,从而使松嫩平原成为我国土壤盐渍化和芦苇群落演替过程具有突出特色的地区。

1.2 试验设计与方法

选择典型退化的盐碱湿地为研究样地。样地南北长 100m,东西宽 50m,面积达 5000m²,样地地形平坦,微起伏,高差 <20cm。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,这对测试结果的可信性是必要的。将小区分成 10m×10m 的 50 个网格,使样点在试验区内合理散布的原则下,共布置了 20 个测试点(图 1)。整个试验区以芦苇群落为主,而 1 点、3 点、5 点地势略高,为碱茅+芦苇群落。试验小区中,芦苇群落积水时间长,碱茅+芦苇群落相对积水时间短,为季节性积水。因而在水分特征上也具有区域代表性。

取样时间分别为 2005 年 9 月上旬和 2006 年 9 月上旬,该时期处于植物成熟期。分析数据为两次取样数据的平均值。

1.3 样品采集与分析测试

(1)土壤水溶性盐测定 试验小区各测点分别取样,取样深度为 0~10cm,每个样点附近取 3 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:

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

式中, Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度单位为 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)植物生长指标测定 覆盖度采用网格法测定,用 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的样方,其中样方中有 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的方格 100 个,将其水平对正摆放在试验地上方,由上而下数方格。方格中植物占 $1/2$ 以上即为有 1,否则为 0。将 1 累加,除以 100,即为该试验区植被覆盖度。株高用卷尺测量。每个样点选面积为 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的小样方,齐地面剪割,称鲜重,然后置于 80°C 烘干箱中烘干,称量干重。

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 种指标进行研究。4 种指标分别为电导率(EC)、盐分含量(SC)、 pH 、钠吸附比(SAR)。由表 1 可知,盐分含量变异系数最大为 0.85,具有显著的空间变异性。 EC 变异系数仅次于土壤盐分含量为 0.45,同样具有显著的空间变异性。 SAR 变异系数为 0.28。具有中度空间变异性。 pH 空间变异系数最小为 0.05,属于弱变异强度。因此土壤盐化指标(EC 、 SC)空间变异显著,为强空间变异。相比之下,碱化指标(pH 、 SAR)空间变异较小,为中、弱空间变异。 pH 值两年均值为 9.36。表明该小区土壤碱化程度较高,为典型的盐碱湿地。

检验数据的正态分布性是使用空间统计学 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^[14]。通过 Kolmogorov-Smirnov 法进行正态检验,土壤 4 种盐碱化指标均符合正态分布,满足地统计学分析的要求。

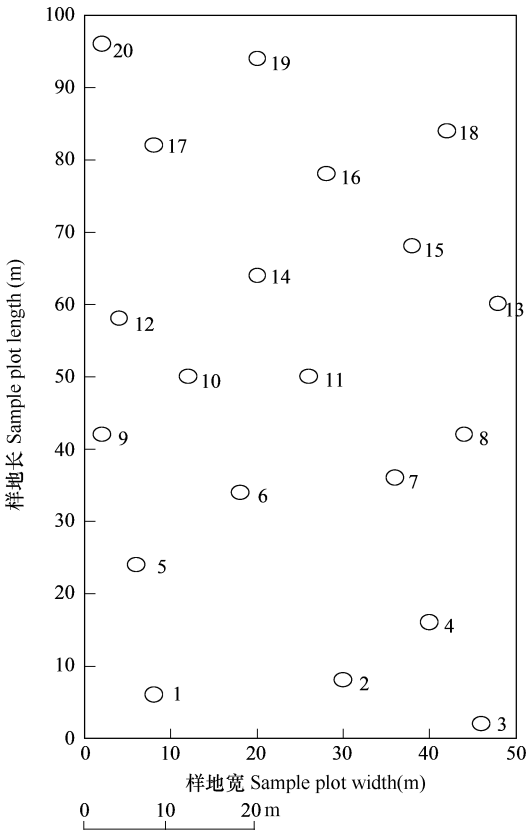


图 1 测量点布置图

Fig. 1 Distribution of measuring points in the experiment site
1,2,3,...,20:采样点 Sampling points

表 1 盐碱化指标统计特征值

Table 1 Statistical feature values of index in saline-sodic land

项目 Chemical property	类型 Distribution type	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Std. Deviation	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kotersis	K-S
pH	正态 Nomal	8.58	10.40	9.36	0.51	0.05	0.452	-0.144	0.920
$EC(\text{mS cm}^{-1})$	正态 Nomal	0.15	0.67	0.31	0.14	0.45	1.544	2.055	0.252
$SC(\text{mg kg}^{-1})$	正态 Nomal	767	11464	3500	2958	0.85	1.75	2.59	0.169
SAR	正态 Nomal	5.49	15.36	9.97	2.76	0.28	0.205	-0.774	0.807

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^[15],在选取土壤盐碱化指标半方差模型时,首先计算半方差值 h 的散点图,然后用不同类型的模型进行拟合,计算得到模型的参数。其中残差平方和(RSS)和决定系数(R^2)可提供模型拟合优劣的精确测度, RSS 越小 R^2 越大说明拟合程度越好。以下所有讨论的模型都是取 RSS 最小且 R^2 较大的最优模型。各项目的半方差模型及其参数值见表 2。由表可知, EC 、 pH 的最优模型为球状模型, SC 为指数模型, SAR 最优模型为线性模型。

块金常数 C_0 反映了区域化变量内部随机性的可能程度。由表 2 可知, EC 、 pH 的 C_0 非常小, 可近似认为 EC 、 pH 在小区范围内的取样间距已经比较合理。而 SC 、 SAR 的 C_0 为正值, 说明小区范围内的取样间距并非最小间距, 内部仍存在变异, 或者分析过程中具有误差。

块金方差/基台值之比(即 $C_0/(C+C_0)$)可表示空间变异性程度(由随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比率), 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 $<25\%$, 说明变量具有强烈的空间相关性; 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^[16]。由表 2 可知, EC 、 pH 、 SC 的 $C_0/(C+C_0)$ 均小于 25% , 具有强烈的空间相关性。而 SAR 的 $C_0/(C+C_0)$ 为 100% , 说明变量的空间相关不存在。表明 SAR 总变异是由随机因素引起的空间异质性。分析原因, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的分布规律同样随土壤盐渍化程度加重而加重。苏打盐渍土区, 土壤盐渍化越重, 土壤中 Na^+ 含量越高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量也相应很高, 从而造成 SAR 在 Na^+ 最高时, 却并未呈现最高值。而在 Na^+ 相对稍低处, SAR 达到最大值。因此 SAR 不存在空间相关性。

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, 表示土壤盐碱化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。从自相关距来看, 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 $EC > SC > pH$, 其中 EC 自相关范围最大, 变程为 $211m$, 即在 $211m$ 范围内土壤 EC 具有空间自相关。 SC 和 pH 变程较小, 分别为 $78m$ 和 $65m$, 因此土壤盐化指标空间自相关范围大于碱化指标。在苏打盐渍土区, 由于各指标具有明显的微域特征, 因此其空间自相关范围不尽相同。结果表明 $211m$ 范围内 EC 的空间变异性主要受微地形影响, SC 、 pH 分别在 $78m$ 和 $65m$ 范围内受微地形影响较大。 SAR 因其不具有空间性, 不予分析。可见在古河道低漫滩区, 微地形对土壤盐碱化的分布具有重要作用。

分维数(D)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^[17]。由表 3 可知, 分形维数 D 表现为 $EC < pH < SC < SAR$ 。 EC 分形维数最小, 空间自相关最为显著。而 SAR 分形维数最大, 其空间自相关最小。

表 2 土壤盐碱化指标半方差模型及其参数值

Table 2 Semi-variance model and parameters

项目 Chemical property	理论模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	变程 Effective Range(m)	块金/基台 $C_0/(C_0 + C)$	决定系数 R^2	残差平方 和 RSS	分维数 D
pH	球状 Spherical	2.33×10^{-4}	2.58×10^{-3}	65	0.09	0.768	1.40×10^{-6}	1.559
EC	球状 Spherical	1.00×10^{-5}	2.91×10^{-2}	211	0.000	0.801	7.11×10^{-5}	1.187
SC	指数 Exponential	0.001	0.591	78	0.002	0.599	0.123	1.614
SAR	线性 Linear	0.082	0.082	79	1.0	0.314	0.024	1.779

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空间分布特征进行具体分析。

由图 2 可知, EC 和 SC 具有相同的空间分布特征, 颜色越浅表明 EC 、 SC 越高。土壤盐化指标在整个小区总体上呈北部较低, 南部较高, 均表现为斑块状分布。由图可知, 在 1 点附近 EC 、 SC 值较高, 其次是 3 点和 5 点相对较高。分析原因, 主要是小区在 1、3、5 点位置相对较高, 在这些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上而下, 由缓坡低处向缓坡高处移动过程

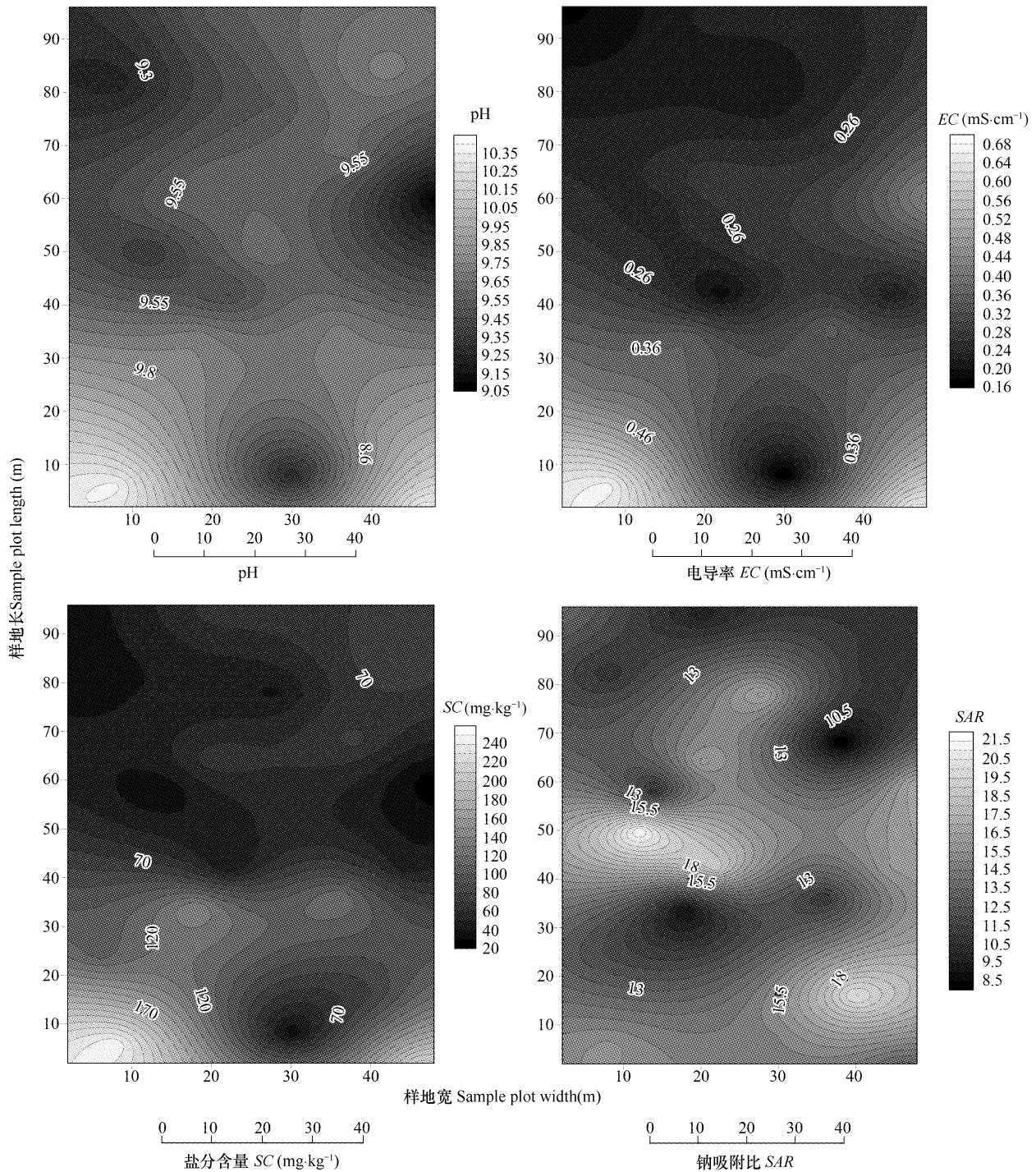


图2 土壤盐碱化指标空间分布图

Fig.2 Kriging map of index of saline-sodic soil

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^[18],因此小区在微高地处土壤盐化指标明显高于低地。

碱化指标 pH 和盐化指标也具有相同的分布特征,北部较低,南部较高,成斑块状分布。随着土壤盐分的增加,土壤碱化程度加重,即土壤盐化的同时伴随着碱化。分析原因,可能由于土壤在积盐和脱盐的交替过程中,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^[19]。而 1、3、5 点地势较高,地表积水时间短,发生积盐和脱盐的频次增加,碱化程度则

相应加重。而 SAR 也呈斑块状分布,然而其最高值并未在小区的最高点 1 点出现,而是在相对稍低的 4 点、9 点和 10 点。由于微域地面高低不平,使相邻近的两层表层出现温度和湿度梯度差,发生土壤水盐及毛管侧向水平运动,Na⁺ 含量高处, Ca²⁺、Mg²⁺ 含量同样高。又由于钙盐在土壤中容易沉淀固定,而钠盐则以游离状态存在于土壤溶液中,因此在 Na⁺ 含量稍低处, Ca²⁺、Mg²⁺ 含量在离子中所占比例更低。从而使 SAR 的空间分布规律较其它指标有所不同。

2.4 盐碱化指标与芦苇关系分析

由表 3 可知,盐碱化指标 EC、SC 和 pH 呈极显著性相关($P < 0.01$),说明苏打盐渍土区盐化的同时,伴随着碱化。盐碱化指标与植物生长指标分析表明,EC 与覆盖度(C)呈显著性负相关($P < 0.05$),而与株高(H)、生物干重(B)呈极显著性负相关($P < 0.01$),pH、SC 仅与株高呈显著性负相关。因此说明,盐碱化指标中 EC 是影响植株生长的最重要的因子。植物生长指标中,株高与盐碱化指标 pH、EC、SC 呈显著性负相关,覆盖度、生物量只与一种指标负相关。因此在植物生长指标中,株高受盐碱化影响最大。分析原因,碱茅+芦苇群落由两种植物种群组成,碱茅植株较矮,而密度较大,因此其盖度较大,生物量也相应较高。因此随着盐碱化指标的增加,株高降低,然而覆盖度和生物量并未达到最小值,也会影响盐分含量和覆盖度、生物量的相关关系。

表 3 盐碱化指标与芦苇生长指标相关分析

Table 3 Pearson analysis of index of saline-sodic soil and reed growth

	pH	EC	SC	SAR	C	H	B
pH	1	0.736 **	0.875 **	-0.276	-0.414	-0.493 *	-0.433
EC	0.736 **	1	0.872 **	0.015	-0.514 *	-0.562 **	-0.588 **
SC	0.875 **	0.872 **	1	-0.181	-0.441	-0.531 *	-0.410
SAR	-0.276	0.015	-0.181	1	-0.036	-0.070	-0.035
C	-0.414	-0.514 *	-0.441	-0.036	1	0.840 **	0.840 **
H	-0.493 *	-0.562 **	-0.546 *	-0.70	0.840 **	1	0.808 **
B	-0.433	-0.588 **	-0.410	-0.035	0.840 **	0.808 **	1

表 4 不同植物群落的盐碱化范围

Table 4 The range of saline-sodic in different communities

群落类型 Community type	pH	EC (mS cm ⁻¹)	SC (mg kg ⁻¹)	SAR
PP	10.0 ~ 10.40	0.40 ~ 0.67	4604 ~ 11464	8.6 ~ 11.08
PA	8.58 ~ 9.67	0.15 ~ 0.43	767 ~ 6553	6.87 ~ 15.36

PA: 芦苇群落 *Phragmites Australis* community; PP 碱茅+芦苇群落 *Puccinellia tenuiflora* + *Phragmites Australis* community; 下同 the same below

由表 4 可知,芦苇群落适应较低值的盐碱化指标,碱茅+芦苇群落适应较高值的盐碱化指标。当 pH > 10.1、EC > 0.4 mS kg⁻¹、SC > 4604 g kg⁻¹时,群落由芦苇群落演替为碱茅+芦苇群落。而 SAR 无明显界限。

表 5 不同群落生境盐碱化程度和生长指标比较

Table 5 Comparison of different communities in indexes of saline-sodic soil and plant growth

群落类型 Community type	pH	EC (mS cm ⁻¹)	SC (g/kg)	SAR	生物量干重 Dry biomass (g)	平均株高 Mean height (cm)	覆盖度 Coverage(%)
PP	10.26 ± 0.09a	0.57 ± 0.09a	8799 ± 2123a	9.68 ± 0.73a	45.17 ± 6.49a	45.50 ± 7.65a	47.17 ± 5.45a
PA	9.20 ± 0.09b	0.26 ± 0.02b	2566 ± 384b	10.02 ± 0.72a	255.0 ± 17.1b	159.7 ± 8.34b	82.21 ± 3.40b

同一列中标有不同字母的数据间差异达到显著水平($P < 0.05$); 下同 Different letters in a column indicate significant difference at $P < 0.05$ level; the same below

由表 5 可知,碱茅+芦苇群落 EC 值为芦苇群落的 2 倍,SC 为芦苇群落的 3 倍,且 pH 也大于芦苇群落,植物生长指标株高、覆盖度、生物量均表现为芦苇群落大于碱茅+芦苇群落。因此随着盐分和 pH 的升高,生长指标呈逐渐减少趋势。随着盐碱化程度的加重,湿地植被正向盐碱化植被退化,表现为植被类型由芦苇群落

向碱茅 + 芦苇群落退化。

经方差分析,碱茅 + 芦苇群落土壤 EC 、 SC 和 pH 含量均高于芦苇群落(表 5),这种差异恰是两类植物群落生理生态特征差异的反映。因为据李建东等研究^[20],本区的碱茅主要为朝鲜碱茅(*Ass. Puccinellia tenuiflora*),属于盐生植物,是松嫩平原碱茅草甸的主要分子。它有很高的耐盐碱性,不仅可以生长在重度盐渍化土壤,甚至可以生长在碱斑(碱土)上。而芦苇则属于广生境植物,虽然有一定耐碱性,但却低于盐生植物碱茅。在生态位上,碱茅 + 芦苇群落所处地势微高,而芦苇群落则相对较低。这是因为尽管大尺度盐碱地一般分布在低洼地带,如松嫩平原西部属于冲积低平原,是整个平原最低洼的区域,也是盐渍化土壤的集中分布区。但在小-微尺度上,由于盐分总是随壤中水从土壤中下部通过毛细作用迁移到上部,因而微地形的上部是盐分的相对聚集区,从而使碱茅 + 芦苇群落占据微地形中较高的生态位,而芦苇群落则处于相对较低的位置。上述两种现象反映出以芦苇群落为优势植物的盐碱湿地在盐碱化加重(即退化)的过程中,芦苇植物群落本身发生相应演替的内在机制。

3 结论

(1)经典统计分析表明:土壤盐碱化指标中 EC 、 SC 变异系数大为显著空间变异, SAR 为中等空间变异强度,而 pH 的变异系数最小为弱空间变异。

(2)地统计分析表明, EC 、 SC 、 pH 在一定的区域范围内具有空间结构特征, EC 、 pH 符合球状模型, SC 符合指数模型。受结构性因素与随机性因素共同作用,土壤盐碱化指标除 SAR 外,均具有高度空间相关性。对分维数的分析表明, SAR 分维数最大,空间相关性最弱, EC 最小,空间相关性最强。因此说明退化湿地盐碱化空间变异主要是受微地形、气候等结构性因素影响,且 EC 受结构性因素影响最大。

(3)从 Kriging 插值的结果可知,土壤盐分的空间分布均表现为条带状和斑块状格局,除 SAR 外,各分布图间存在着较强的空间相似性。盐分分布表现为地势高处盐分含量高,碱化程度重的规律,说明微地形在湿地盐碱化空间变异具有重要作用。

(4) EC 与植物生长指标呈显著性相关,是影响植物生长的盐碱化指标中最重要因子。当土壤 $EC > 0.40 \text{ mS cm}^{-1}$ 、 $SC > 4604 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $pH > 10.09$ 时,小区群落由芦苇退化为碱茅 + 芦苇群落,且随着盐碱化指标增加,芦苇所占比例逐渐减小,植被类型由中-轻度盐碱化湿地型向中-重度盐碱化湿地型过渡。

References:

- [1] Sun G Y. Distribution formation and utilization of inland saline — alkaline wetland in Songnen Plain. He Y, Song Y X. Research of Agricultural Comprehensive Development in Northeast Region. Beijing: Science Press, 2001. 62 — 68.
- [2] Li Q S, Deng W. Formation and evolution of salt marsh plain in western Songnen. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(4): 362 — 367.
- [3] Zhang Y M, Wang L J, Qu T B. Study on re source ecological management of phragmites australis and its high productivity. Journal of Jilin Agricultural University, 2005, 27(3): 280 — 28.
- [4] Yang F, Deng W, Yang J F, et al. Effects of soil moisture and electrical conductivity on growth and population distribution of phragmites australis. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 199 — 201.
- [5] Xin H W. Fractal Theory and application. Hefei: University of Science and Technology of China, 1993.
- [6] Tanji K K. A conceptual hydrosalinity model for predicting salt local in irrigation return flow. Managing Saline Water for Irrigation, 1997, 14: 49 — 65.
- [7] Webster R, Oliver M A. Stat Mehtodes in Soil and Land Resource Survey. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [8] Song X S, Deng W, He Y, et al. Methods and Prospect on Spatial Variation of Salt in Soil. Chinese Journal of Soil Science, 2001. 32(6): 250 — 254.
- [9] Li Z Z, Gong Y S. Spatial variability of soil water content and bulk soil electrical conductivity and determination of sampling number in field. Journal of China Agricultural University, 2000, 33(5): 59 — 66.
- [10] Yao R J, Yang J S, Jiang L. Study on spatial variability and appropriate sampling quantity of soil salinity in Yellow River Delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 89 — 94.
- [11] Yao R J, Yang J S, Liu G M, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering, 2006,22(6):61—66.
- [12] Yang J F, Deng W, Zhang G X. Field-scale spatial variability of soil salinity and alkalinity in a saline-sodic soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):500—505.
- [13] Yang F, Deng W, Zhang G X, *et al.* Spatial variation of soil saline ions and its relations with vegetation community of phragmites australis in a saline-sodic soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2008,45(4):594—600.
- [14] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998,9(6):651—657.
- [15] Wang Z Q. Application of geostatistics in ecology. Beijing: Science Press,1999.177—178.
- [16] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1501—1511.
- [17] Zhao B, Cai Q H. An application of geostatistical analysis in freshwater ecosystem. *Acta Hydrobiologica*, 2000,24(5):514—520.
- [18] Ranbir Chhabra. Soil Salinity and Water Quality. USA:A. A. Balkema Publishers,1996. 156—167.
- [19] Wang Z Q. Saline soil in China. Beijing: Science Press, 1993. 21—22.
- [20] Li J D, Wu B H, Sheng L X. Vegetation in Jilin. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2001. 223.

参考文献:

- [1] 孙广友. 内陆盐碱湿地的分布规律与形成机制及整治利用——以松嫩平原为例. 何岩, 宋玉祥. 东北区域农业综合开发研究. 北京: 科学出版社, 2001. 62~68.
- [2] 李取生, 裴善文, 邓伟. 松嫩平原土地次生盐碱化研究. *地理科学*, 1998, 18(3): 268~272.
- [3] 张友民, 王立军, 曲同宝, 等. 芦苇资源的生态管理与芦苇的高产培育. *吉林农业大学学报*, 2005, 27(3): 280~28.
- [4] 杨帆, 邓伟, 杨建锋, 等. 土壤含水量和电导率对芦苇生长和种群分布的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 199~201.
- [5] 辛厚文. 分形论及其应用. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.
- [8] 宋新山, 邓伟, 何岩, 闫百兴. 土壤盐分空间分异研究方法及展望. *土壤通报*, 2001. 32(6): 250~254.
- [9] 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. *中国农业大学学报*, 2000, 33(5): 59~66.
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 89~94.
- [11] 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. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61~66.
- [12] 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. *土壤学报*, 2006, 43(3): 500~505.
- [13] 杨帆, 邓伟, 章光新, 等. 苏打盐渍土地芦苇地土壤盐分离子空间变异与群落关系研究. *土壤学报*, 2008, 45(4): 594~600.
- [14] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651~657.
- [15] 王政权. 地统计学在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 177~178.
- [17] 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. *水生生物学报*, 2000, 24(5): 514~520.
- [19] 王遵亲. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993. 21~22.
- [20] 李建东, 吴榜华, 盛连喜. 吉林植被. 长春: 吉林科学技术出版, 2001. 223.