

基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究*

姚荣江¹ 杨劲松^{1†} 姜 龙² 陈德明¹

(1 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

(2 沈阳化工学院信息工程系,沈阳 110142)

摘 要 通过对黄河三角洲地区典型地块土壤盐渍剖面的聚类分析,研究并总结该地区不同盐分剖面类型土壤含盐量在水平方向以及垂直方向的分布特征和规律,运用该规律对各盐渍剖面类型的空间分布进行了探讨。结果表明:研究区土壤盐分剖面可以明显分为表聚型、底聚型和平均型 3 类,按照垂直分布特征可将 0~180 cm 土体划分为 0~20 cm、20~80 cm、80~120 cm 和 120~180 cm 四个层次;研究区土壤含盐量在垂直方向和水平方向上变异较强,总体上盐分分布具有一定的表聚性,且各土层含盐量的规律性可以作为判断土壤盐分剖面类型的依据;受结构性因素和随机性因素的共同影响,各土层含盐量均表现为中等的空间自相关性和相同的空间自相关变化尺度。Kriging 插值与空间分析结果表明,微地形和气候条件是影响表层土壤盐分空间分布的主要因素,地下水性质主导深层土壤盐分的空间分布;表聚型盐分剖面是研究区最主要的剖面类型,其次分别为底聚型和均匀型;不同盐分剖面类型的空间分布反映了植被类型和土地利用方式的差异,人为农业措施是形成底聚型与平均型盐分剖面的最直接因素。该研究结果为黄河三角洲地区盐渍土地的分区、改良、管理以及合理利用提供了理论基础和实践依据。

关键词 聚类分析;盐渍剖面;空间分布;Kriging 插值
中图分类号 S156.4 文献标识码 A

盐渍化是制约黄河三角洲地区农业生产发展的主要障碍因子之一,盐渍土地的改良利用对实现该区土地资源的可持续利用具有重要意义,而对土壤盐渍剖面类型、特征及其空间分布的定量研究是实现盐渍土地科学管理及合理利用的必要前提。近年来,利用数值分析方法,对土壤盐渍化程度、类型、盐渍土分布以及土壤盐渍化发展方向进行判断,已有很多较为详细的报道。李文银等^[1]用聚类分析的方法探讨了山西省盐碱土土属的分类问题。李韵珠^[2]应用多元统计方法对曲周北部盐渍土区的土壤盐渍化类型和土壤盐分剖面类型进行了分析,据此得出近年来该区盐渍土处于脱盐化过程的结论。杨柳青^[3]用主组元分析的方法研究了新疆苏打盐土的特征与类型,并在此基础上提出了新疆苏打盐渍土分级的主要性质指标。白由路等^[4]运用系统聚类分析的方法研究了整个黄淮海平原土壤盐渍剖面特征及其空间分布,提出了整个黄淮海平原土壤剖面中以脱盐型

为主。至今,国内已有研究以黄淮海平原和西北内陆地区为主,对河口地区及海涂土壤的盐渍特征及其空间变异的研究较少。为此,本文以黄河三角洲地区典型地块为例,运用聚类分析方法对该地区不同盐分剖面类型土壤含盐量在水平方向以及垂直方向的分布特征和规律进行了分析和总结,并结合 GIS 和地统计学方法,对土壤盐分以及不同盐渍剖面类型的空间分布进行了探讨。了解并掌握土壤盐渍剖面特征及其空间分布可为黄河三角洲地区盐渍土地的科学管理、合理利用以及精准改良提供一定的理论参考和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于山东省垦利县永安镇“东义和村”与“东七村”为主体的研究区域(图 1),地理位置介于 118°47'45"~118°50'26" E,37°33'30"~37°34'5" N

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目课题(2006AA100207)、国家科技支撑计划课题(2006BAD05B04,2006BAD05B02)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-406-3)和国家自然科学基金项目(40771097)资助

† 通讯作者,E-mail:jtsyang@issas.ac.cn

作者简介:姚荣江(1980~),男,江苏靖江人,博士研究生,主要从事土壤水盐运动和土壤盐渍化预测预报。E-mail:rjyao@issas.ac.cn

收稿日期:2006-09-27;收到修改稿日期:2006-12-05

之间。该区地处北温带大陆性季风型气候带,东临渤海,属典型黄河下游三角洲地区。区内四季气候变化明显,降水主要集中在7~8月份,占全年降水量的70%,年均蒸降比3.22。由于土壤直接发育于海相沉积物,再加上成陆过程中受海水的浸渍侧渗作用,研究区土壤含有较多的可溶性盐类,滨海潮盐土是该区最主要的盐土类型。区内地下水位普遍较

高,多介于1.6~2.4 m之间,平均矿化度达 32.4 g L^{-1} ;由于当地缺乏蓄水工程,雨季水量丰富但不能调蓄,非雨季淡水资源紧缺,这导致研究区地下水埋深及矿化度的季节性动态变化显著,再加上该区地下水与土壤中的可溶性盐类互为“源-库”关系,由此也引起了土壤含盐量呈现“积盐-淋溶”的季节性动态变化。

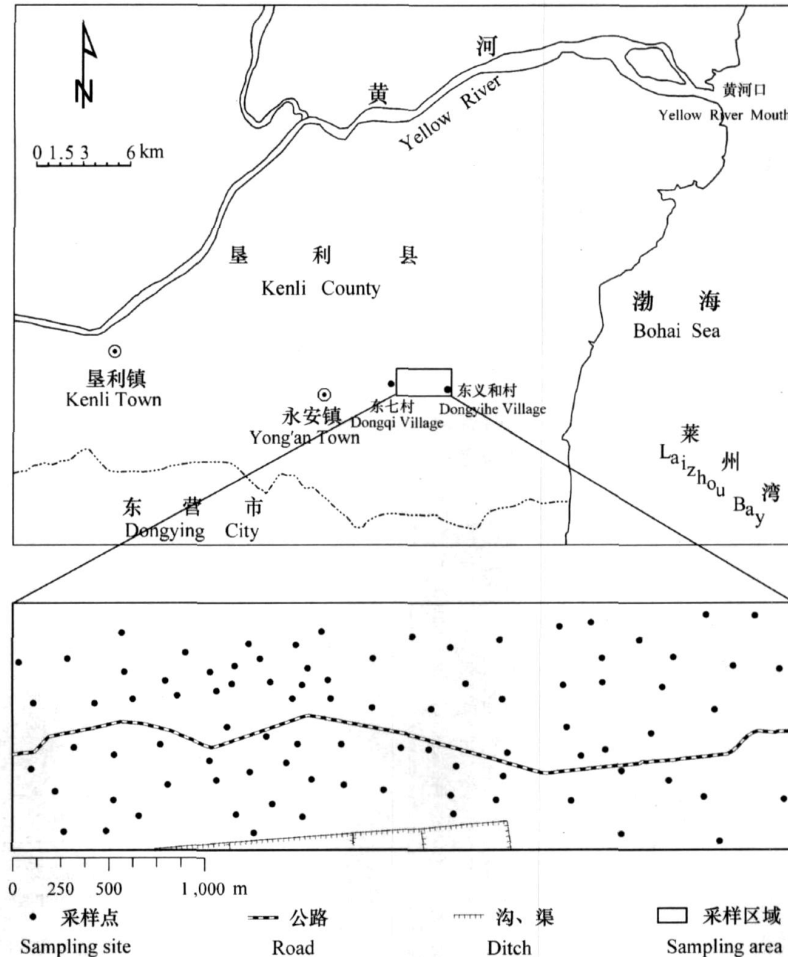


图1 研究区域地理位置及采样点分布图

Fig. 1 Geographic location map of the study area and sampling site distribution map

1.2 研究方法

1.2.1 采样布置 选取一块面积约 510 hm^2 的连续地块(东西长约4 km,南北宽约1.2 km)作为研究区域,区内地势相对平坦,其南部为一条自西向东的灌溉渠。采样点位置与数量的确定综合考虑当地土质、植被类型以及土地利用方式等因素,在土地利用强度较高的部位适当提高采样密度,共挖取89个地下水埋深大于1.8 m的代表性土壤剖面,其中棉花(玉米)地35个,盐蒿地17个,光板地19个,其余均

为杂草地,采样点分布如图1所示。每个剖面均对0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm、120~140 cm、140~160 cm和160~180 cm土层进行分层采样,共计采集890个土壤样品。各采样点的相对坐标采用差分GPS定位技术确定。

样点采集分别于2004年10月中下旬及2005年9月下旬(均为旱季)分两次进行,正值棉铃吐絮期,一方面此时的地下水埋深对土壤次生盐渍化的影响较

大,地下水性质受人为因素的影响较小。另一方面9月中旬至来年3月地下水动态可视为相对稳定期,此时耕层土壤盐分及地下水性质较为稳定,地下水的消退主要靠天然蒸发,而此时的蒸发量也不大。

1.2.2 样品处理与分析 采集的土样带回实验室内自然风干,磨碎、过2 mm筛后备用,所有的土样均制备1:5土水比浸提液,并测定其电导率 $EC_{1:5}$;从以上采集的土样中选取31个土壤剖面,共计310个土壤样品,用于测定离子组成。具体测定方法参照文献[5],采用常规分析法(土水比1:5)确定土壤各离子组成含量,计算出相应的土壤全盐含量,进一步可以得出该区土壤全盐含量与浸提液电导率之间的换算关系:

$$S_t = 2.9478 EC_{1:5} - 0.1210 \quad (r = 0.992^{**}, n = 310) \quad (1)$$

式中,**表示显著性水平在 $p < 0.01$; S_t 表示土壤全盐含量($g \cdot kg^{-1}$); $EC_{1:5}$ 为1:5土水比土壤浸提液电导率($mS \cdot cm^{-1}$)。对于未测定离子组成的土壤样品,其全盐含量可由浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 经方程(1)换算得到。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分剖面类型的聚类分析

为了解研究区不同部位的土壤盐分剖面特征与类型,本文根据土壤剖面中上下层盐分含量之间的关系,对研究区89个采样点剖面进行了Q型聚类分析,结果(图2)表明:根据欧氏距离系数,可将采样点剖面明显分为3大类。按照各类的典型剖面分布特征,这3类剖面分别为:表聚型盐分剖面、底聚型盐分剖面和平均型盐分剖面。根据黄河三角洲的盐渍化条件和土壤盐渍现状分析,表聚型和平均型盐分剖面可以认为是积盐型剖面,其区别是表聚型的积盐强度大而平均型积盐强度小;底聚型盐分剖面则认为是脱盐型剖面。

表聚型盐分剖面的主要特征是土壤表层20 cm以上含盐量较高,其他土层含盐量明显少于该层,这种类型剖面的典型特征示于图3。在本研究区这种类型的剖面共有42个,主要为光板地以及部分的盐蒿地,占聚类剖面总数的47%。通过对黄河下游三角洲盐渍土的形成因素判断,具有该类特征的盐分剖面,可认为目前土壤脱盐过程进行的不太明显,土壤盐分的运移处于上升状态或平衡状态,如果没有人为

因素的强烈干扰或适宜的气候条件(如降雨),这种类型的土壤在近期内不会发生明显的脱盐过程。

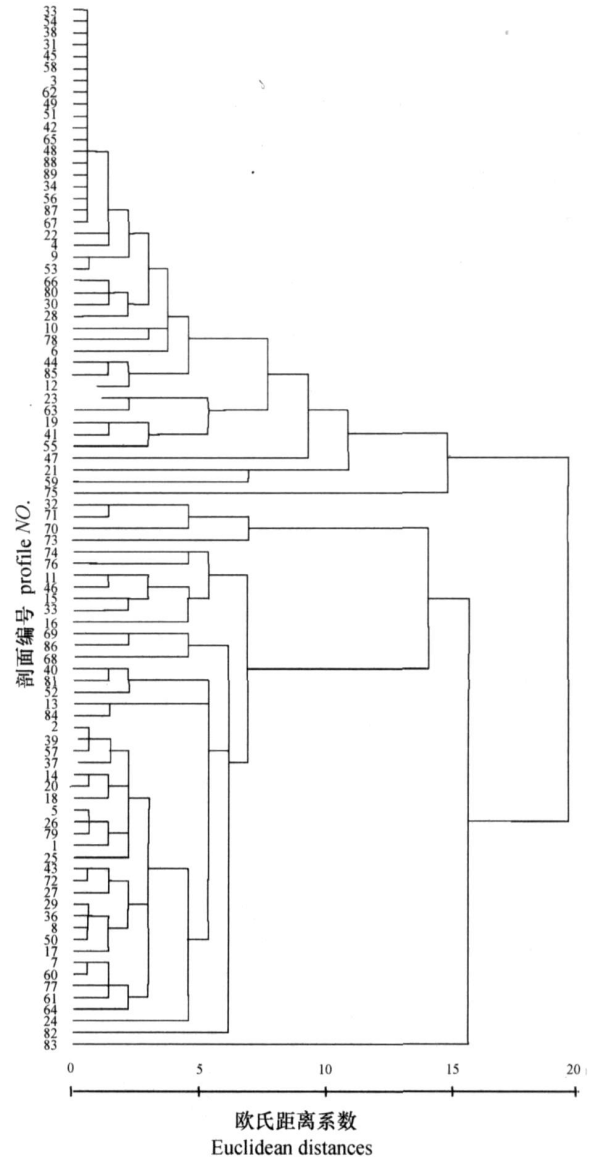


图2 土壤盐分剖面类型的聚类分析图

Fig. 2 Hierarchical cluster plots indicating soil salinity profile types

底聚型盐分剖面的特征是表层含盐量低,而底层土壤含盐量较高,具有该特征的典型剖面盐分状况见图3。可以看出,该类型盐分剖面80 cm深度以下土层盐分高于表层0~20 cm土壤,而0~80 cm深度土壤含盐量的变化较为复杂,其含盐量往往并不随深度呈一定的升高趋势,它实际反映的是短期内气候因素对该类型盐分剖面的作用结果。由于采样季节正处于秋季稳定积盐期,使得盐分在0~10 cm呈一定的积聚状态,但这并不影响其作为底聚型盐分剖面的本质。当此类剖面中底层土壤盐分较高时,土壤次生盐渍化的威胁较大,容易发生次生盐渍

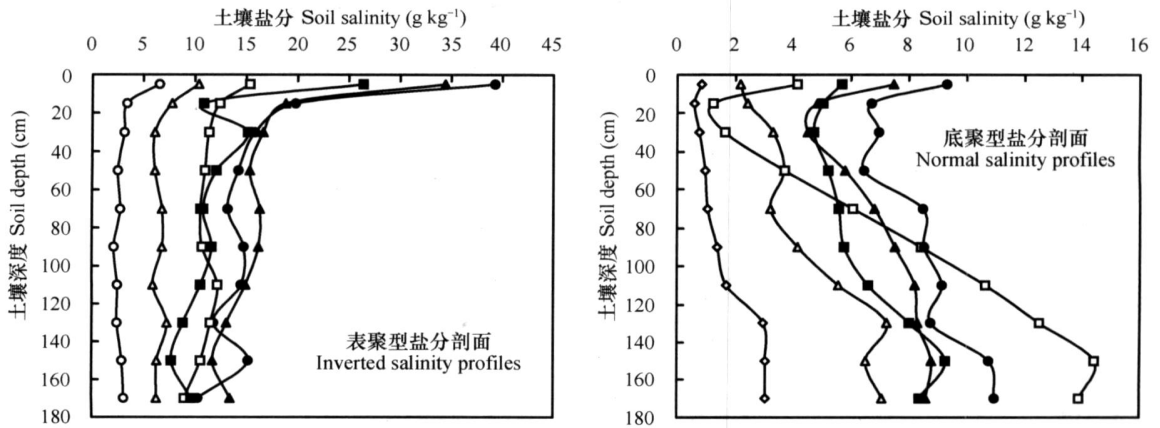


图3 典型盐分剖面类型部分采样点土壤含盐量的分布

Fig. 3 Soil salinity distribution patterns of some sample sites for the typical salinity profile types

化。在整个研究区这种类型的剖面最多,为46个,占聚类剖面总数的52%,该剖面类型土壤的地表植被以棉花/玉米以及杂草为主。

平均型盐分剖面是指0~180 cm土体土壤含盐量差异不大的剖面类型,在研究区这种盐分剖面类型的数量最少,只有1个。平均型盐分剖面0~180 cm土体盐分状态总趋势是整体剖面含盐量平衡,随着深度的变化,土壤含盐量稍有变化,这表明具有这种剖面特征的土壤,其盐分处于总体平衡状态,但由于采样季节正处于季节性积盐期,此时气候、地形等因素的综合作用促使盐分向上运移的强度大于盐分向下运移的强度,因此,在本文中平均型盐分剖面可以归为弱积盐型剖面。

对于不同的盐分剖面类型,其土壤含盐量在垂直方向上的分布具有显著的差异性,它直接影响到土壤的利用、改良以及分类。因此,为详细区分土壤盐分在不同深度层次上的特征与类型,进一步对不同深度的土壤盐分进行聚类分析,结果(图4)表明:研究区盐分剖面的10个采样层次可以明显分为3类,即0~20 cm的表层、20~120 cm的中间层以及120~180 cm的底层,其中20~120 cm可进一步分为20~80 cm和80~120 cm两个土层。该结果表明研究区0~20 cm、20~80 cm、80~120 cm和120~180 cm各深度内采样层土壤含盐量较为一致,具有较好的关联性。为了进一步研究方便,本文按照聚类分析结果将各采样土层分为0~20 cm、20~80 cm、80~120 cm和120~180 cm四个层次,各层次土壤含盐量可以通过深度加权方法计算得出。

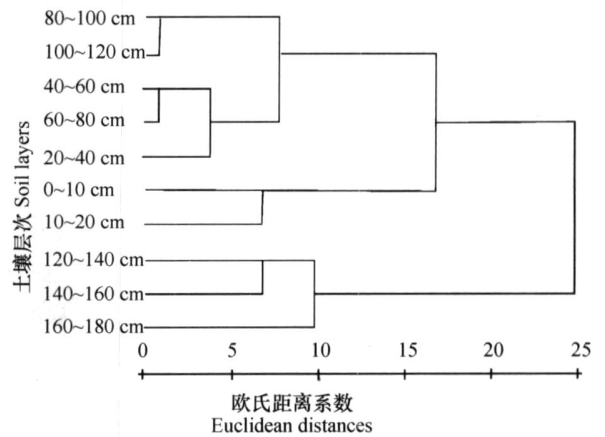


图4 采样土层含盐量的聚类分析图

Fig. 4 Hierarchical cluster plots of soil salinity at sampling layers

2.2 土壤盐分剖面分布特征

表1列出了不同层次土壤盐分的统计特征值。从变幅来看:0~20 cm土层盐分的变化幅度为 34.32 g kg^{-1} ,20~80 cm、80~120 cm与120~180 cm土层盐分变化幅度分别为 19.62 g kg^{-1} 、 18.17 g kg^{-1} 和 17.53 g kg^{-1} ,表层土壤盐分的变幅要明显高于其他土层。各层土壤含盐量均值的变化范围在 $6.63 \sim 9.77 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,总体上属于重度盐化土类型(含盐量 $4.0 \sim 10.0 \text{ g kg}^{-1}$),说明了土壤高度盐渍化是制约该区农业生产的重要因素;此外,不同深度盐分含量均值具有一定的差异,0~20 cm土壤盐分要明显高于其他土层,说明各层土壤平均盐分含量在垂直方向上变异较强,即总体上盐分分布具有一定的表聚性,这主要与黄河下游三角洲地区特定的

气候、水文水资源、地形等条件而导致的季节性积盐密切相关。由变异系数可以看出,各土层盐分的变异程度相差较大,变化范围在 52.88%~93.45%之间,均表现为中等变异强度,造成这种现象的原因在于研究区内微地形起伏、土地利用方式差异、灌溉制

度以及耕作方式不同等因素;随着土壤深度的增加,这些因素对盐分的影响逐渐减弱,导致盐分在水平方向上的变异强度趋弱,表现为变异系数随深度增加不断减小。

表 1 不同层次土壤盐分的统计特征值

Table 1 Statistical eigenvalues of soil salinity at different layers

深度 Depth (cm)	样本数 Number of samples	分布类型 Distribution type	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 C. V. (%)	K-S <i>p</i>
0~20	89	LN	0.38	34.70	9.77	9.13	93.45	0.252 *
20~80	89	LN	0.31	19.93	6.63	5.12	77.22	0.544
80~120	89	N	0.82	18.99	7.43	4.76	64.06	0.222
120~180	89	N	0.77	18.30	7.47	3.95	52.88	0.640

注:LN表示对数正态分布;N表示正态分布;*显著性水平在 $p < 0.05$ (双尾检验) Note:LN and N mean logarithmic normal distribution and normal distribution respectively, * means significance at 5% level (two-tailed)

对土壤含盐量的传统统计分析只能从总体上概括土壤盐分状况的全貌,不能反映出不同剖面类型土壤含盐量的变化特征。为此,分别以研究区最主要的两类盐分剖面(即表聚型和底聚型)的表层0~20 cm土壤含盐量为参照,将其与同一采样剖面的其他土层含盐量进行比较,结果见图5。可以看出,对于底聚型盐分剖面类型,所有剖面120~180 cm和80~120 cm土壤含盐量均要高于表层0~20 cm,且120~180 cm土壤含盐量要高于80~120 cm,而20~80 cm土壤含盐量变化相对复杂,并没有明显规律性;对于表聚型盐分剖面,所有剖面表层0~20 cm

土壤含盐量均要高于其余土层。由于盐分剖面特征反映的是不同土层间土壤含盐量的规律性,因此这种规律性也可以作为判断土壤盐分剖面类型的依据。由此,本文中认为:当0~20 cm土壤含盐量小于80~120 cm和120~180 cm土壤,且80~120 cm土壤含盐量小于120~180 cm时,该盐分剖面类型为底聚型;当0~20 cm土壤含盐量较20~80 cm、80~120 cm和120~180 cm均要高时,则为表聚型盐分剖面;均不满足这些条件则归为平均型盐分剖面。

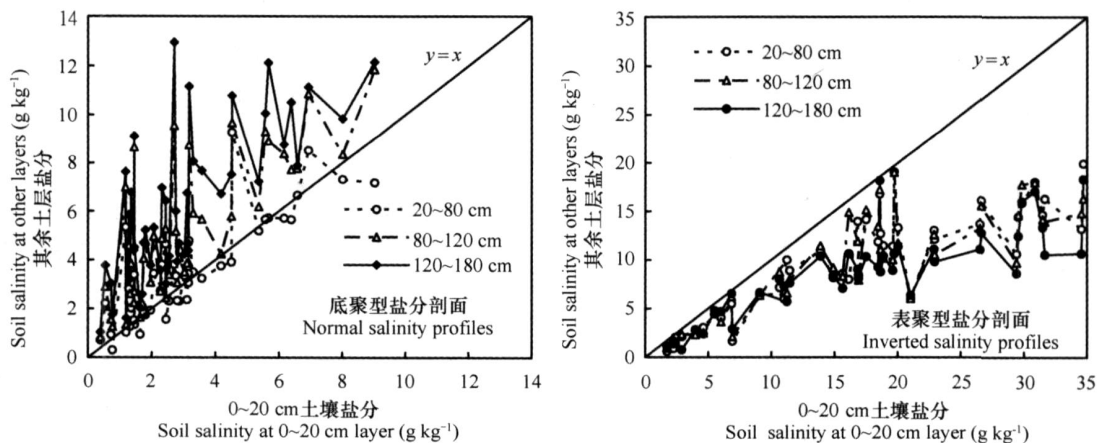


图 5 典型盐分剖面类型不同土层含盐量间的关系

Fig. 5 Relationship between soil layers in soil salinity in the typical salinity profile types

2.3 土壤盐分空间变异特征分析

为根据各土层含盐量间的规律性探讨研究区不同盐分剖面类型的空间分布,必须首先获得研究区不同土层含盐量的空间分布。由于变异函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[6-8],对各土层含盐量进行单样本 K-S 正态检验 ($p < 0.05$, 双尾) 发现:80 ~ 120 cm 和 120 ~ 180 cm 土层含盐量服从正态分布,而 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 80 cm 土层含盐量均不符合正态分布,经对数转化后都呈近似的正态分布,已满足地统计学分析的要求(表 1)。

半变异函数理论模型及参数的确定可参考有关文献^[9-12]。表 2 列出了各土层含盐量的半方差函数模型及其参数,可以看出,各土层盐分的理论半方差函数均比较符合高斯模型。块金值 C_0 通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,较大的块金方差值表明较小尺度上的某些过程不容忽视。总体来说,各土层盐分的块金效应均较大(表

2),这说明在小于当前的研究尺度下,影响土壤盐分变异的过程作用还比较强。土壤盐分块金值/基台值变化范围在 39.27% ~ 51.86% 之间,可见,各层土壤盐分均体现为中等的空间相关性。这说明土壤盐分的空间分布是由结构性因素(如气候、地形、土壤类型等)和随机性因素(如施肥、耕作措施等各种人为活动)共同作用的结果。分维数 D 表示变异函数曲线的曲率大小,通过变量 D 值之间的比较,可以确定空间异质性的程度^[13,14]。各层土壤盐分的分维数范围分别在 1.838 ~ 1.897,且分维数随土壤深度增加呈降低趋势。尽管分维数的差别不是很大,但仍然可以看出随机性和结构性因素引起的空间异质性程度的不同。比较各土层盐分的分维数变化可以看出(表 2),分维数越高,块金值/基台值也越高,随机性因素强;分维数越低,块金值/基台值也越低,随机性因素弱。其原因在于随机性因素强,结构性差,结构性差意味分布复杂,从而分维数高;相反随机性弱,结构性好,分布简单,从而分维数低。

表 2 各土层含盐量的半方差函数模型类型及相应的参数

Table 2 Semivariance models for soil salinity at all layers and corresponding parameters

深度 Depth (cm)	理论模型 Theory model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C + C_0$	块金值/基台值 Nugget/ Sill $C_0 / (C + C_0)$ (%)	变程 Range (m)	R^2	D
0 ~ 20	G	0.961	1.853	51.86	3 374	0.873	1.897
20 ~ 80	G	0.627	1.316	47.64	3 388	0.864	1.883
80 ~ 120	G	15.40	35.52	43.36	3 260	0.911	1.855
120 ~ 180	G	10.50	26.74	39.27	3 682	0.953	1.838

注:G表示高斯模型;D表示分维数 Note: G and D mean Gaussian model and Fractal respectively

从自相关距来看,各层土壤盐分的自相关距在 3 260 ~ 3 682 m 之间,差异不大,这说明了各层土壤盐分的空间自相关变化的尺度是相同的。其原因在于该区受海水的浸渍侧渗作用较为强烈,地下水的矿化度极高(平均值为 32.4 g L^{-1}),且地下水埋深多介于 1.8 ~ 2.2 m;此外,该区独特的气候、微地形等条件作用,引起了地下水盐分与土壤盐分间的频繁交换以及各土层盐分含量的周期性动态变化,使土壤盐分组成与含量在很大程度上受着地下水性质的影响,且土壤含盐量总体上呈现出“积盐—淋溶”的季节性动态变化趋势。这些因素的综合作用使得各土层含盐量的空间相关性减弱,朝均一化方向发展,导致了其空间自相关距趋于一致的现象。

2.4 Kriging 空间插值分析

由各土层含盐量的空间分布及等值线图(图 6)看出,研究区土壤含盐量东部高于西部,各土层盐

分含量的分布在空间上存在着较强的相似性。从空间尺度来看,土壤盐分从东部向西北部位逐渐降低,即含盐量沿着海岸向腹地的延伸方向呈现显著下降的趋势。其原因在于地下水中可溶性盐类是导致研究区土地盐渍化最主要的因素,也是土壤盐分的最主要来源,因此各土层含盐量总体表现出与地下水矿化度相似的空间分异规律;此外,研究区西部土地利用以棉花种植为主,耕作、灌溉等人为农业活动较为频繁,这不仅稀释了地下水矿化度还加快土壤脱盐,因此,人为农业活动也是导致这种盐分分布格局形成的重要因素。必须注意的是,不当的农业措施极易引起该部位土壤次生盐渍化。从局部上看,研究区表层 0 ~ 20 cm 土壤含盐量南部高于北部,在坐标值(0 ~ 800 m, 2 000 ~ 3 000 m)范围内空间变异性最大,而其余土层含盐量最高值均在研究区东部,且土壤含盐量的空间变异相对平

缓。原因在于表层土壤盐分的空间分布是与微地形、气候、地下水性质等因素密切相关的,由于该部位地势相对较低且微地形起伏较大,再加上受研究区南部沟渠的影响,旱季持续的强烈蒸发作用使地下水返盐强烈,即深层土壤以及地下水中的可溶性盐类借助毛细管作用上升并积聚于表土,导致该部

位土壤盐分的表聚性和空间变异性要明显强于其他部位。事实上通过对研究区土壤盐分状况的实地调查,该部位绝大部分为裸露的盐斑地。随着深度的增加,微地形、气候条件等因子对盐分空间分布的影响程度逐渐弱化,地下水性质对土壤盐分空间分布的主导作用越来越明显。

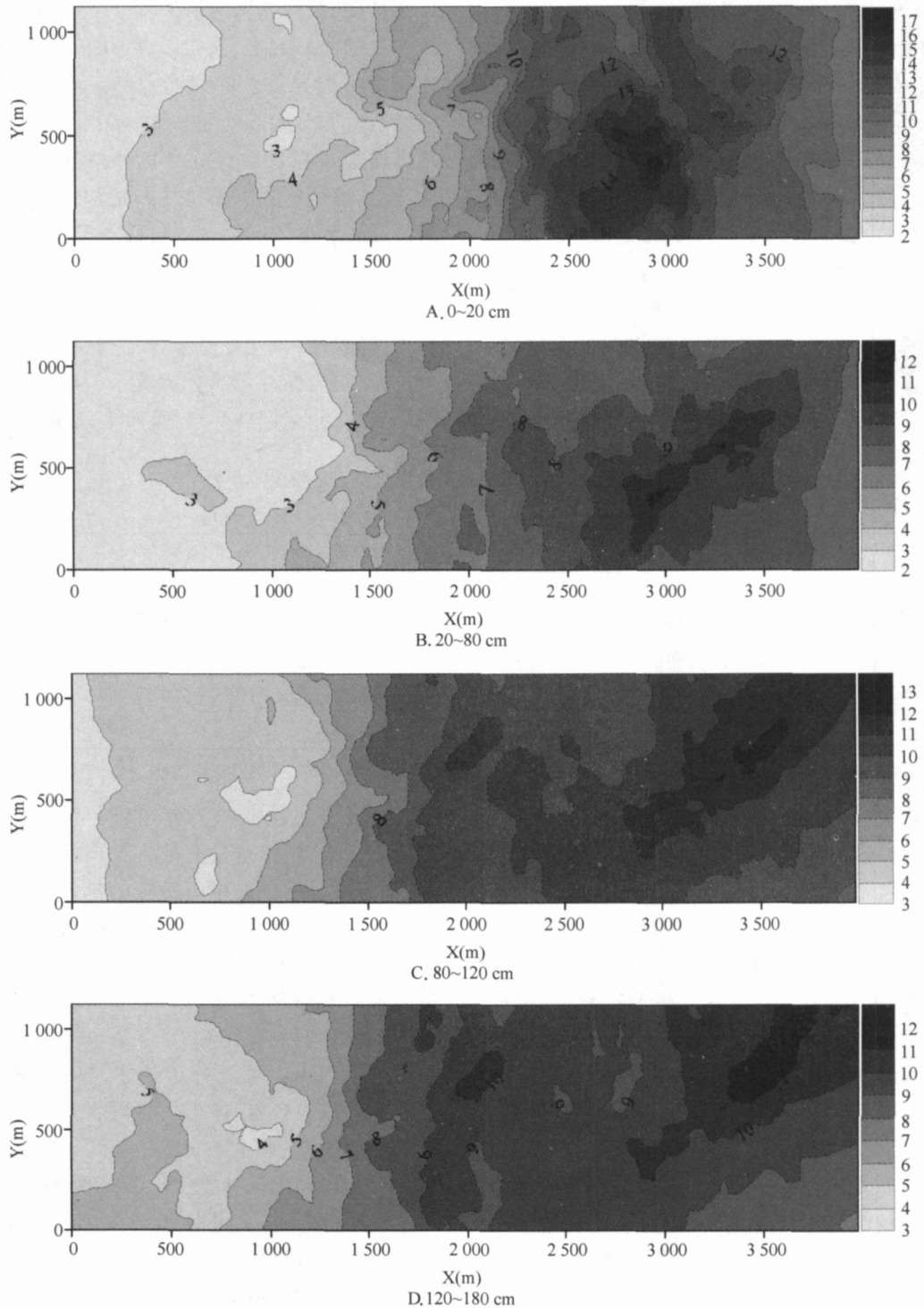


图 6 各土层含盐量的空间分布及等值线图

Fig. 6 Spatial distribution and contour maps of soil salinity for all layers ($g\ kg^{-1}$)

2.5 土壤盐剖面类型的空间分布

利用 ArcGIS8.3 的 Spatial Analyst 模块分别对不同层次土壤含盐量进行 Kriging 空间内插(具体的理论模型和参数见表 2),得到 10 m ×10 m 分辨率的栅

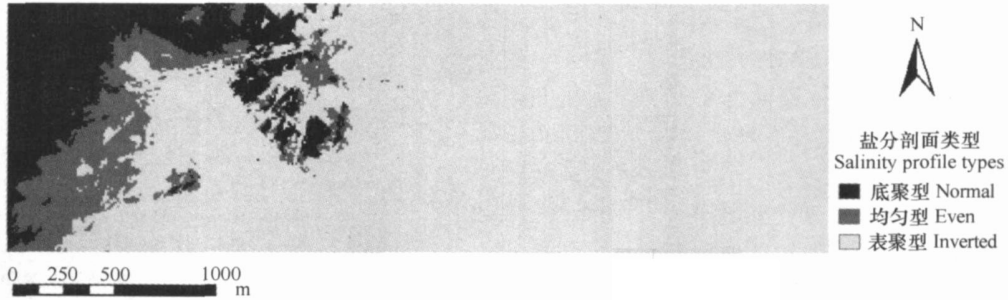


图 7 研究区不同盐剖面类型的空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of different salinity profile types in the study area

从分布面积来看,研究区土壤盐剖面类型以表聚型为主,其分布面积为 400.1 hm^2 ,占研究区面积的 77.9%;其次为底聚型盐剖面,分布面积为 63.9 hm^2 ,占总面积的 12.4%;平均型盐剖面分布面积最小,为 49.8 hm^2 ,仅占研究区面积的 9.7%。从空间分布来看,研究区的东部均为表聚型盐剖面,底聚型和平均型盐剖面主要连片分布于研究区的西部,此外还在研究区中部附近呈插花状分布。不同盐剖面类型的空间分布在一定程度上也反映了植被类型和土地利用方式的差异,由于研究区西部土壤盐分相对较低(图 7),土地利用以棉花/玉米种植为主,因此该部位频繁的人为农业措施是形成底聚型和平均型盐剖面的最主要因素。而在研究区东部,由于土壤盐分相对较高,主要为光板地以及零星分布的盐蒿地,土地改良利用难度大,因此该部位土地基本处于未利用状态,受人为因素的影响较小。必须指出的是,尽管图 2 中底聚型盐剖面的数量要多于表聚型盐剖面,但这并不意味着底聚型盐剖面的分布面积要大于表聚型,其原因在于黄河三角洲地区盐分是变异性较强的土壤属性,在研究区局部部位,底聚型和平均型盐剖面以插花状分布为主,面积较小且分散,而表聚型则连片分布。

本文综合运用数值分析、GIS 和地统计方法对黄河三角洲地区土壤盐渍剖面特征进行了分析,并探讨了土壤盐渍状况以及不同盐渍剖面类型的空间分布。与传统研究结果相比,采用本文新研究方法取得的结果可以合理减少田间土壤采样层次的数量,提高采样效率,不仅获得土壤盐渍状况的空间分

布,还得到了盐渍剖面类型的空间分布,其结果为预测该地区土壤盐渍化的发生发展、指导当地农业生产实践以及盐渍土地的科学改良提供一定的理论基础和参考依据。此外,黄河三角洲地区独特的水文水资源、地形地貌、土壤母质等条件决定了该区土壤水盐运动极其活跃。在不同的气候及田间条件下,土壤盐分及其剖面类型的空间分布不仅具有空间的变异性,而且具有时间变异性,因此在以后的研究中要重视同一定位点上的时空变异性的研究。

3 结 论

1) 研究区土壤盐剖面可以明显分为表聚型、底聚型和平均型 3 类,其中表聚型和平均型属于积盐型剖面,底聚型属于脱盐型剖面;按照不同土层间含盐量的相似性,可以将 0~180 cm 土体各采样层分为 0~20 cm、20~80 cm、80~120 cm 和 120~180 cm 四个层次。

2) 研究区土壤盐分分布呈一定的表聚性,在垂直方向上变异较强,在水平方向上的变异强度随深度的增加不断下降;对于不同盐剖面类型,各土层含盐量均具有一定的规律性,这种不同土层间含盐量的规律性可以作为判断土壤盐剖面类型的依据。

3) 空间结构性分析表明,各土层含盐量在一定的区域范围内具有空间结构特征,均较好地符合高斯模型分布。受结构性因素和随机性因素的共同影响,各土层含盐量的空间自相关程度均属于中等,且

其空间自相关变化的尺度是相同的。

4) 从 Kriging 插值的结果看出,土壤含盐量的空间分布均呈现为东部高、西部低,离海岸线距离越近土壤盐分越高的规律,且各土层含盐量的分布存在空间上的相似性。微地形起伏、气候条件以及人为农业活动是影响表层土壤盐分空间分布的主要因素,地下水性质主导深层土壤盐分的空间分布。

5) 空间分析结果表明,表聚型盐分割面为研究区最主要的剖面类型,其次是底聚型盐分割面,平均型盐分割面的分布面积最小;不同盐分割面类型的空间分布反映了植被类型和土地利用方式的差异,人为农业措施是形成底聚型和平均型盐分割面的最直接因素。

参考文献

- [1] 李文银, 张永武. 聚类分析在山西省盐碱土土属分类中的应用初探. 土壤学报, 1986, 23 (2): 172 ~ 177. Li W Y, Zhang Y W. The preliminary investigation on the application of cluster analysis in the lower category classification of saline-alkali soil in Shanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1986, 23 (2): 172 ~ 177
- [2] 李韵珠. 区域土壤盐渍化状态分析. 土壤肥料, 1992 (5): 8 ~ 11. Li Y Z. The analysis of the regional soil salinity status (In Chinese). Soils and Fertilizers, 1992 (5): 8 ~ 11
- [3] 杨柳青. 新疆苏打盐渍土分级的初步研究. 八一农学院学报, 1990, 13 (1): 39 ~ 46. Yang L Q. Preliminary study on the classification of soda saline soils in Xinjiang (In Chinese). Journal of August 1st Agri. College, 1990, 13 (1): 39 ~ 46
- [4] 白由路, 李保国. 黄淮海平原土壤盐渍化状况的数值分类. 土壤通报, 2001, 32 (增刊): 8 ~ 13. Bai Y L, Li B G. Quantitative classification of soil salinization in the Huang-Huai-Hai Plain (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32 (Suppl.): 8 ~ 13
- [5] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K ed. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [6] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecological Monographs, 1992, 62: 277 ~ 314
- [7] 杨玉建, 杨劲松. 典型潮土区土壤耕层盐分含量的趋势效应研究. 灌溉排水学报, 2004, 23 (6): 10 ~ 13. Yang Y J, Yang J S. The trend variability of soil salt content in the representative fluvo-aquic soil area (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23 (6): 10 ~ 13
- [8] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55 (5): 555 ~ 566. Guo X D, Fu B J, Chen L D, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and Kriging analysis (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (5): 555 ~ 566
- [9] 汪景宽, 赵永存, 张旭东, 等. 海伦县土壤重金属含量的空间变异性研究. 土壤学报, 2003, 34 (5): 398 ~ 403. Wang J K, Zhao Y C, Zhang X D, et al. Study on the spatial variability of heavy metal contents in black soils in central areas of Hailun (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 34 (5): 398 ~ 403
- [10] Shen Z Q, Shi J B, Wang K, et al. Neural network ensemble residual Kriging application for spatial variability of soil properties. Pedosphere, 2004, 14 (3): 289 ~ 296
- [11] 牛灵安, 郝晋珉, 覃莉, 等. 盐渍土改造区土壤养分的时空变异性研究. 土壤学报, 2005, 42 (1): 84 ~ 90. Niu L A, Hao J M, Tan L, et al. Spatio-temporal variability of soil nutrients in salt-affected soil under amelioration (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (1): 84 ~ 90
- [12] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem. Pedosphere, 2004, 14 (4): 501 ~ 508
- [13] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市郊耕地土壤交换性锰含量的空间变异性. 土壤, 2004, 36 (1): 61 ~ 64. Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, et al. Spatial variability of exchangeable manganese content in cultivated soils of Shenyang suburbs (In Chinese). Soils, 2004, 36 (1): 61 ~ 64
- [14] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, 2000, 55 (4): 428 ~ 438. Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau—Semivariograms (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (4): 428 ~ 438

PROFILE CHARACTERISTICS AND SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL SALINITY BASED ON HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS

Yao Rongjiang¹ Yang Jingsong^{1†} Jiang Long² Chen Deming¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Department of Information Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China*)

Abstract Characteristics and regularity of spatial, horizontal and vertical, distribution of soil salinity in different salinity profile types were studied and summarized through application of hierarchical cluster analysis of typical soil salinity profiles in the Yellow River Delta, and these regularities were then used to explore spatial distribution of different salinity profile types. Results show that soil salinity profiles could be obviously classified into normal, inverted and even, and a soil profile of 180 cm in depth could be divided into four layers, 0 ~ 20 cm, 20 ~ 80 cm, 80 ~ 120 cm and 120 ~ 180 cm in terms of the vertical distribution characteristics. Soil salinity exhibited strong variation in spatial distribution, both horizontal and vertical, salt accumulation at the surface soil layer was generally significant, and the regularity of soil salinity at different layers could serve as a reference for the classification of salinity profile types. Owing to compound impact of structural and stochastic factors, soil salinity at these layers all exhibited moderate spatial variation and identical spatial autocorrelation scale. The results of Kriging interpolation and spatial analysis indicated that the spatial distribution of soil salinity in surface layer was chiefly dominated by micro-topography and climate conditions, while the spatial distribution of soil salinity at deeper layers was mainly controlled by groundwater properties. The study area was predominated with inverted salinity profile types and, followed by normal and even ones, respectively. The distribution patterns of salinity profile types reflected variation of vegetation types and land use patterns to some extent, and human agricultural activity was the crucial reason for the formation of normal and even salinity profile types. The research results can serve as a theoretical and practical basis for zoning, amelioration, management and rational utilization of saline soils in the Yellow River Delta.

Key words Hierarchical cluster analysis; Soil salinity profile; Spatial distribution; Kriging interpolation