

黄河三角洲县域尺度的盐渍化土壤化学参数特征研究^①

蒋名亮^{1,2}, 陈小兵^{2*}, 单晶晶², 郭建青³, 孙运朋⁴, 赵凌云⁵, 徐力刚¹

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264000; 3 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710000; 4 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 5 天津泰达绿化集团有限公司, 天津 300457)

摘要: 地处黄河三角洲的山东省垦利县土地资源丰富、土地利用率低, 但区域内土壤盐渍化程度高, 理化性质空间变异大, 严重制约土地的有效开发利用。本研究通过在县域范围内进行面上布点采样及实验室化学分析, 系统研究了垦利县县域尺度 0~20 及 20~40 cm 土层土壤盐分及其化学参数间的通径关系及土壤盐渍化的空间分异特征。结果表明: 调查期间的垦利县 0~20 cm 土层土壤盐分高于 20~40 cm 土层, 除 pH 外两层土壤各项化学参数的变异系数都在中等变异以上; 影响 0~20 及 20~40 cm 两层土壤盐分($EC_{5:1}$)的直接土壤化学参数为 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} , 4 个参数有非常好的线性回归曲线; 0~20 cm 土层土壤沿海岸线表现出强烈的盐化和钠质化现象, 而 20~40 cm 土层整体上盐分和钠吸附比均小于表层土壤, 盐化和钠质化较弱; 土壤 pH 则表现为 20~40 cm 土层高于 0~20 cm 土层, 其碱化现象较为明显。研究结果为垦利县土壤盐分研究提供可靠的基础数据及经验公式, 同时可为垦利县土壤盐渍化治理提供科学依据及理论指导。

关键词: 垦利县; 土壤盐渍化学参数; 经典统计分析; 空间分异

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A

作为土壤特性不确定性的主要来源之一^[1-2], 土壤的空间变异性在土壤学研究中经常被提及^[3-4]。由于受母岩、气候、地形、生物等因素影响不同, 土壤的理化和生物特性在区域不同空间位置上存在差异, 也称为土壤的空间异质性或土壤的空间变异性^[5-6]。土壤空间变异性是土壤重要的自然属性之一^[7]。土壤的理化状况是时空的连续变异体, 具有高度的空间异质性^[8]。研究土壤静态分异的主要手段为统计学理论, 包括以概率论为基础的经典统计学和以区域化变量理论为基础的地统计学^[9]。国内外不少学者基于统计学理论研究了区域土壤理化特性的静态空间分异^[10-12], 其中在黄河三角洲地区利用不同的科学手段也进行过大量的此类研究^[13-15]。姚荣江等^[16]、王红等^[17]、董芝等^[18]通过土样采集室内分析的数据获取手段, 分析了不同条件不同尺度下土壤盐分的空间分异情况。其中, 王红等^[17]利用整个黄河三角洲上的多尺度采样数据, 探索了 30~40 cm 和 90~100 cm 深度土壤盐分的空间分异, 分析了不同

尺度、深度土壤盐分的变异系数和空间相关性的变化以及形成这种空间变异的地貌因素, 并使用普通克里金插值的方法对土壤盐分的空间区域分布进行了估测。姚荣江等^[19]、孙运朋等^[20]利用大地电导率仪测定田间尺度下的土壤表观电导率, 利用半方差模型和克里金插值的方法研究土壤盐分分布。其中, 孙运朋等^[20]使用 EM38 电导率仪测定表观电导率, 采用经典统计学和地统计学的方法研究了黄河三角洲滨海棉田地表以下 0.375、0.75、1.5 m 深度土壤电导率在春、夏、秋 3 个季节的时空变异性^[21]。安乐生等^[22]、王卓然等^[23]、吴向东等^[24]及杨劲松等^[25]利用统计学的方法研究了土壤水盐关系及其空间分布。其中, 杨劲松等^[25]使用黄河三角洲收集到的 86 个表层土壤的盐分、pH 及水分数据, 采用经典统计和地统计的方法分析了三者的空间变异特性及相关性, 并得出随机性因素是引起土壤盐分、pH 和水分异质性的主要因素。此外不少学者还研究了黄河三角洲土壤容重、离子、养分及植物群落、人为影响的空间分异及相互关

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD02003003)、东营市重点研发计划项目(2016YF17)、山东省重点研发计划项目(2017CXGC0316)和江苏省科技计划项目(BZ2014005, BE2014739)资助。

* 通讯作者(xbchen@yic.ac.cn)

作者简介: 蒋名亮(1989—), 男, 江西吉安人, 硕士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: ghygza@126.com

系^[26-30],另外还有一些方法探讨方面的研究^[31]。但在县域尺度上对土壤电导率与盐分离子的通径关系以及综合讨论土壤盐渍化参数(EC、SAR 和 pH)空间分异的研究并不多见。

本文通过在垦利县面上采集土样,送入实验室测试其多项化学参数,使用描述性统计及通径分析的经典统计方法研究了土壤各项化学参数的基本情况及土壤电导率与化学离子的相关关系,并使用克里金插值的地统计方法分析了土壤盐碱化特征参数的空间分布情况。研究结果有助于了解垦利县土壤盐分等多项化学性质的基本情况,建立的经验公式可以帮助省略某些土壤调查项目和试样分析项目,为减少工作成本的同时为类似调查研究提供参考,且土壤盐碱化参数的空间插值结果对县域范围内土壤盐渍化科学治理和土地利用方式规划具有重要的指导意义。此外,研究县域土壤化学性质的空间变异性,不仅对理解陆海交界土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义,对今后深化土壤与植物的关系、植被的空间格局和各种生态过程对土壤影响的程度和尺度等研究也有非常重要的参考价值。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

垦利县隶属山东东营市,全县均在黄河三角洲北部的海积冲积平原范围内,地理坐标 37°24'~38°10' N,118°15'~119°19' E。垦利县年内平均气温 13.1℃,平均无霜期 210 d,历年平均降雨量 532.6 mm,而年均蒸发量 1 860.9 mm,蒸降比达 3.5,属于暖温带季风大陆性气候。研究区降水集中在 6—9 月,而 5、6 月的蒸发量最大^[32-33],地下水埋深多介于 1.6~2.4 m,平均矿化度为 24.63 g/L^[20],强烈的年降水变异与较浅的地下水埋深及低平的地势条件使得研究区内冬季干旱,而夏季易发生渍涝灾害。研究区土壤类型主要为盐化潮土,盐碱土面积占土壤总面积的 2/3^[34],主要农作物为比较耐盐的棉花、小麦和玉米,自然植被主要有翅碱蓬、柽柳、芦苇等。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布置 采样前在室内利用 Google earth 软件,采用目视解译的方法,在东营市垦利县范围及周边区域内以 2 km 为最短距离均匀设置 149 个采样点。依据预设采样点于 2013 年 9 月 13 日至 2013 年 9 月 28 日对调查区域由东至西、由南至北进行为期 16 d 的野外采样。由于采样设计过程中使用的地图与实际地理位置存在一定的偏差,因此某些预

设位置(例如湿地、水面)不能到达,实际采样 141 个,剔除一些样品丢失的点,位于垦利县内的采样点合计 99 个,其中 64 个采样点位于棉田,26 个采样点在小麦、玉米和翅碱蓬地,其余 9 个采样点处于光板地。本研究采样点分布见图 1。在各采样点上,使用土钻采集 0~20、20~40 cm 土层土壤,分别使用密封袋封存编号,同时使用手持 GPS 导航仪记录下采样点准确位置。在采样同时,记录采样点土地利用情况和周边的植被、水文特征和地形地貌等。

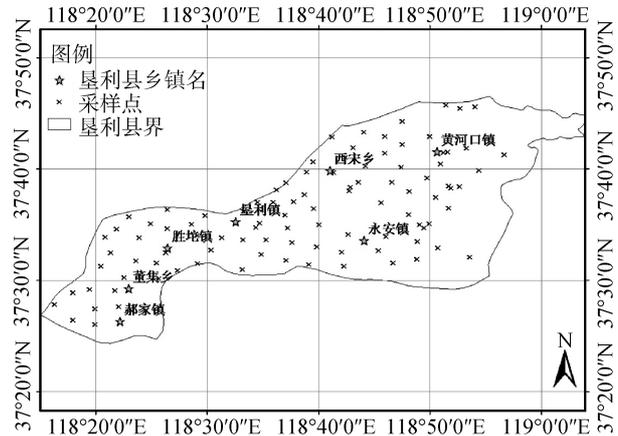


图 1 垦利县面上调查实际采样点
Fig. 1 Actual sampling sites in Kenli County

1.2.2 土样分析 土壤的电学特性是指示土壤含盐量的一个重要指标,土壤溶液的电导率与土壤含盐量呈正相关关系。本文使用水土比 5:1 的土壤浸提液电导率 $EC_{5:1}$ 来表征土壤盐分含量, $EC_{5:1}$ 采用 DDSJ-308A 电导率仪测定;使用 PHSJ-4A 型 pH 计测定水土比 5:1 的土壤浸提液的 pH;同时,土壤浸提液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子使用中科院烟台海岸带研究所测试分析中心的 Dionex ICS3000 离子色谱仪测定。

钠吸附是指土壤溶液中 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度平均值的平方根比值,用于反映土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的存在对交换性 Na^+ 碱化作用的中和作用,亦可以用于指导土壤的灌溉^[35]。根据 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 摩尔浓度以及公式(1)可以计算出土壤的钠吸附比 SAR。

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

1.2.3 研究方法 黄河三角洲土壤盐渍化严重,土壤盐分空间变异性较大,对整个区域进行盐渍土治理改良需要统筹兼顾。本文使用经典统计的分析方法对垦利县土壤盐分的多项化学参数进行描述;使用通径

分析确定土壤盐分及其化学元素间的直接与间接相关关系,通过建立回归方程,以减少面上土壤调查的工作量;通过地统计空间插值分析土壤盐碱化主要参数的空间分布,以了解研究区域的土壤盐碱化情况,为土壤盐碱化改良分区治理提供重要的理论依据。

通径分析是数量遗传学家 Swell Wright 于 1921—1923 年在研究遗传学中继承关系时提出的一种多元统计方法^[36]。通径分析可以将自变量和因变量之间表面直接相关性分解为它们之间的直接作用和间接作用,从而能够分别研究自变量对因变量的直接作用大小和间接作用大小^[37]。通径系数计算方法参照刘广明等^[38]。

1.2.4 数据处理 本文使用 Origin 8.0、SPSS 20 及 Excel 软件对土壤的浸提液化学参数进行描述性统计、参数正态检验及通径分析计算;使用 ArcGIS10.2 进行克里金插值分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤电导率及离子组成的经典统计

2.1.1 描述性统计 表 1 的统计结果显示,两层土壤所含盐分中 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 含量较高,而 K^+ 含

量很低,离子浓度的平均值排序为 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,可见垦利县土壤盐分以 NaCl 为主,说明其盐分来源主要为海水。比较 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤浸提液的 $\text{EC}_{5:1}$ 及各个离子可以看出,0~20 cm 土层各项化学参数均大于 20~40 cm 土层,可见面上调查期间土壤呈现出表层聚盐现象。但 20~40 cm 土层土壤浸提液的 SAR 和 pH 均大于 0~20 cm 土层,说明 20~40 cm 土层土壤钠质化和碱化现象相对更为明显,对土壤理化性质和植物生长的影响更为严重^[39]。

就土壤浸提液各化学参数的变异系数而言,除 pH 为弱变异外,其余参数均为中等变异和强变异。0~20 cm 土层 SO_4^{2-} 为中等变异,其余参数变异系数均大于 1,为强变异,其中 Cl^- 变异性最强;20~40 cm 土层 SO_4^{2-} 和 SAR 为中等变异,其余均为强变异,以 K^+ 变异性最强,变异系数大于 2;两层土壤盐分离子中以 SO_4^{2-} 变异性最弱。这些都表明 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 这些离子对地形地貌、水文气象以及人类活动等外界环境的影响很敏感,是随环境变化的敏感因子,是决定土壤盐化的主要变量^[40]。

表 1 土壤浸提液化学性质统计特征值($n=99$)
Table 1 Statistical characteristics of chemical properties of soil extraction

土层(cm)	化学参数	极小值	极大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	分布类型
0~20	Cl^-	3.75	3652.36	363.56	706.86	0.16	-1.00	1.94	LgN
	SO_4^{2-}	6.49	380.62	90.23	74.33	-0.39	-0.72	0.82	LgN
	Na^+	4.10	1875.76	180.73	320.81	0.09	-0.73	1.78	LgN
	K^+	0.51	51.79	5.12	9.31	1.31	2.74	1.82	LgN
	Ca^{2+}	5.24	273.87	41.16	45.16	0.53	-0.24	1.10	LgN
	Mg^{2+}	0.83	181.01	21.84	42.47	0.89	-0.07	1.95	\bar{N}
	SAR	0.42	38.17	6.82	7.23	-0.18	-0.94	1.06	LgN
	pH	7.91	9.30	8.53	0.27	0.39	0.54	0.03	N
20~40	$\text{EC}_{5:1}$	0.08	9.06	1.36	1.84	0.32	-0.74	1.36	LgN
	Cl^-	2.00	1913.00	225.10	357.73	-0.12	-0.90	1.59	LgN
	SO_4^{2-}	7.00	304.00	76.79	57.72	-0.63	-0.37	0.75	LgN
	Na^+	3.00	935.00	130.24	165.97	-0.27	-0.37	1.28	LgN
	K^+	0.01	46.00	2.98	6.49	1.99	5.76	2.18	LgN
	Ca^{2+}	4.00	177.00	27.14	27.84	0.52	0.09	1.03	LgN
	Mg^{2+}	1.00	110.00	10.52	17.55	0.70	-0.16	1.66	\bar{N}
	SAR	0.31	32.76	7.58	6.95	-0.43	-0.24	0.92	LgN
	pH	8.11	9.43	8.71	0.27	0.34	-0.06	0.03	N
$\text{EC}_{5:1}$	0.01	5.00	0.92	1.08	0.04	-0.82	1.06	LgN	

注:表中 N 表示正态分布; \bar{N} 表示非正态分布;LgN 表示对数正态分布,相应的偏度和峰度都是对数转换后的;离子单位 mg/L,电导率单位 mS/cm。

峰度反映数据的中心聚集程度, SPSS 软件统计中的正态分布峰度为 0, 本研究两层土壤大部分化学参数的峰度都小于 0, 说明测量的数据比较离散。偏度反映数据分布的对称程度, 正态分布偏度为 0, 偏度较大的正值表明该分布右侧具有较长尾部, 而较大的负值表明左侧有较长尾部。0~20 cm 土层土壤 SO_4^{2-} 、SAR 偏度小于 0, 说明这两项数据小值较多, 而其他参数为正, 表达的意义则相反; 20~40 cm 土层土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、pH 和 $\text{EC}_{5:1}$ 的偏度小于 0, 说明值比较小的数据较多, 而其他化学参数偏度大于 0, 则值大的数据较多。

2.1.2 通径分析 表 2 和表 3 分别为 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土样水浸提液的化学参数相关系数矩阵。从垦利县的整个采样范围来看, 0~20 cm 土层, Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 SAR 与 $\text{EC}_{5:1}$ 有显著的正相关性, 相关系数均在 0.7 以上, 特别是 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 与 $\text{EC}_{5:1}$ 的相关系数都在 0.9 以上,

呈现出极显著相关, 而 Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 间的相关系数也均在 0.9 以上, 再次说明海水是土壤盐分主要来源。20~40 cm 土层, Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 $\text{EC}_{5:1}$ 有显著的正相关性, 相关系数均在 0.7 以上, 其中 Cl^- 、 Na^+ 与 $\text{EC}_{5:1}$ 的相关系数在 0.9 以上, 呈现出极显著相关, 而且 Cl^- 与 Na^+ 间的相关系数也均在 0.9 以上, Cl^- 与 Mg^{2+} 的相关系数也达 0.895, 说明这 3 个离子具有较为密切的关系与相同的来源。

以 0~20、20~40 cm 土层每层土壤的 99 个土样为总体, 以各土样 $\text{EC}_{5:1}$ 作为因变量, 各个离子组成 (Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+)、钠吸附比 (SAR) 以及 pH 作为自变量进行相关分析, 各个量之间的相关系数如表 2 和表 3 所示。根据这些数据, 应用 Excel 矩阵计算公式分别计算两层土壤各自变量的直接通径系数, 然后利用直接通径系数计算间接通径系数, 结果见表 4 和表 5。

表 2 0~20 cm 土层土壤浸提液化学性质相关系数矩阵
Table 3 Correlation matrix of chemical properties of 0~20 cm soil extraction

	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SAR	pH	$\text{EC}_{5:1}$
Cl^-	1								
SO_4^{2-}	0.689**	1							
Na^+	0.981**	0.702**	1						
K^+	0.593**	0.503**	0.607**	1					
Ca^{2+}	0.752**	0.625**	0.636**	0.370**	1				
Mg^{2+}	0.942**	0.668**	0.871**	0.547**	0.874**	1			
SAR	0.807**	0.677**	0.869**	0.457**	0.414**	0.631**	1		
pH	-0.323**	-0.249*	-0.227*	-0.204*	-0.599**	-0.428**	0.025	1	
$\text{EC}_{5:1}$	0.981**	0.743**	0.956**	0.561**	0.799**	0.937**	0.816**	-0.360**	1

注: **表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关(双侧); *表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关(双侧)。表 3 同。

表 3 20~40 cm 土层土壤浸提液化学性质相关系数矩阵
Table 3 Correlation matrix of chemical properties of 20~40 cm soil extraction

	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SAR	pH	$\text{EC}_{5:1}$
Cl^-	1								
SO_4^{2-}	0.535**	1							
Na^+	0.959**	0.590**	1						
K^+	0.536**	0.345**	0.560**	1					
Ca^{2+}	0.716**	0.406**	0.532**	0.255*	1				
Mg^{2+}	0.865**	0.413**	0.715**	0.416**	0.935**	1			
SAR	0.668**	0.526**	0.814**	0.439**	0.147	0.318**	1		
pH	-0.386**	-0.400**	-0.274**	-0.131	-0.644**	-0.545**	0.029	1	
$\text{EC}_{5:1}$	0.929**	0.588**	0.900**	0.441**	0.730**	0.817**	0.684**	-0.441**	1

从表 4 可以看出, 0~20 cm 土层土壤浸提液各离子对 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接通径系数从大到小依次为 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 。 K^+ 直接通径系数较

小, 而它通过其他因素对电导率的间接通径系数之和也较小, 说明它对土壤 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接效应和间接效应都较小, 不是影响溶液电导率的主要因子。 Mg^{2+}

和 SO_4^{2-} 的直接途径系数并不高,但是它们的间接途径系数之和却较大,这是由于它对 $\text{EC}_{5:1}$ 的间接效应为其他化学性质要素的直接效应所增强。 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 对 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接途径系数和间接途径系数都比较大,说明它们对 $\text{EC}_{5:1}$ 的影响除了有很强的直接效应外,还具有显著的通过其他因素所反映的间接效应,在表观上表现为与 $\text{EC}_{5:1}$ 呈显著相关,说明

它们是影响 $\text{EC}_{5:1}$ 的最重要的因素。鉴于 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 是影响 0 ~ 20 cm 土层土壤浸提液电导率的主要因素,进一步得出土壤 $\text{EC}_{5:1}$ 与 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 间的多元回归方程:

$$\text{EC}_{5:1} = 0.0004[\text{Cl}^-] + 0.004[\text{Na}^+] + 0.012[\text{Ca}^{2+}] + 0.085 \quad (\text{Adj.}R^2 = 0.975) \quad (2)$$

表 4 0 ~ 20 cm 土层土壤浸提液化学性质对 $\text{EC}_{5:1}$ 的途径系数
Table 4 Path coefficients of chemical properties to $\text{EC}_{5:1}$ of 0-20 cm soil extraction

	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	总和
Cl^-	0.566*	0.053	0.292	-0.018	0.163	-0.076	0.981
SO_4^{2-}	0.390	0.077*	0.209	-0.016	0.136	-0.054	0.743
Na^+	0.556	0.054	0.298*	-0.019	0.138	-0.070	0.957
K^+	0.336	0.039	0.181	-0.031*	0.080	-0.044	0.561
Ca^{2+}	0.426	0.048	0.189	-0.011	0.217*	-0.070	0.799
Mg^{2+}	0.534	0.052	0.259	-0.017	0.190	-0.080*	0.937

注:表中标注*者为直接途径系数,其他为间接途径系数;表 5 同。

表 5 20 ~ 40 cm 土层土壤浸提液化学性质对 $\text{EC}_{5:1}$ 的途径系数
Table 5 Path coefficients of chemical properties to $\text{EC}_{5:1}$ of 20-40 cm soil extraction

	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	总和
Cl^-	0.295*	-0.003	0.578	-0.025	0.226	-0.096	0.975
SO_4^{2-}	0.158	-0.006*	0.356	-0.016	0.129	-0.046	0.575
Na^+	0.283	-0.003	0.603*	-0.026	0.168	-0.080	0.945
K^+	0.159	-0.002	0.339	-0.046*	0.081	-0.046	0.485
Ca^{2+}	0.212	-0.002	0.322	-0.012	0.315*	-0.104	0.730
Mg^{2+}	0.255	-0.002	0.430	-0.019	0.295	-0.112*	0.847

从表 5 可以看出,20 ~ 40 cm 土层土壤浸提液各个化学参数对 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接途径系数从大到小则依次为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 SO_4^{2-} , K^+ 、 SO_4^{2-} 的直接途径系数都很小,而它们通过其他因素对电导率的间接途径系数之和也比较小,说明它们对土壤 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接效应和间接效应都较小,不是影响溶液电导率的主要因子。 Mg^{2+} 的直接途径系数较小,但是它通过其他因素对 $\text{EC}_{5:1}$ 的间接途径系数之和却较大,这是由于它对 $\text{EC}_{5:1}$ 的间接效应为其他化学性质要素的直接效应所增强。 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 对 $\text{EC}_{5:1}$ 的直接途径系数和间接途径系数都比较大,说明它们对 $\text{EC}_{5:1}$ 的影响除了有很强的直接效应外,还具有显著的通过其他因素所反映的间接效应,在表观上表现为与 $\text{EC}_{5:1}$ 呈显著相关,说明它们是影响 $\text{EC}_{5:1}$ 的最重要的因素。由于 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 是影响 20 ~ 40 cm 土层土壤浸提液电导率的主要因素,可以进一步得出它们与 $\text{EC}_{5:1}$ 的多元回归方程:

$$\text{EC}_{5:1} = 0.0004[\text{Cl}^-] + 0.004[\text{Na}^+] + 0.0099[\text{Ca}^{2+}] + 0.0915 \quad (\text{Adj.}R^2 = 0.966) \quad (3)$$

式(2)和(3)中, Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 离子浓度单位为 mg/L; $\text{EC}_{5:1}$ 为 5 : 1 水土比土壤浸提液电导率,单位为 mS/cm; SAR 为钠吸附比,无量纲。

0 ~ 20 cm 土层土壤剩余途径系数为 0.145, 20 ~ 40 cm 土层土壤的剩余途径系数为 0.181, 剩余途径系数值较大,说明还有一些对土壤 $\text{EC}_{5:1}$ 影响较大的因素没有得到考虑,鉴于主要离子中还有 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 未进行相关性分析和途径系数分析,这个影响较大的因素可能就是 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 。途径分析得到的多元回归方程对于土壤研究工作具有重要意义,在已知 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 $\text{EC}_{5:1}$ 其中 3 个参数的情况下可以推求出另外一个参数,这可以大量减少土壤分析的成本和时间,同时可以为同类研究提供参考。

2.2 县域尺度土壤盐渍化参数的空间分布特征

在 ArcGIS 软件地统计模块中,对两层土壤的 $\text{EC}_{5:1}$ 、pH 和 SAR 采用普通克里金方法进行插值,在插值过程中均选择球状半变异函数模型,并适当调整相关的参数,插值结果见图 2, $\text{EC}_{5:1}$ 插值图根据土壤盐化分级指标对应的电导率分为 5 个等级^[41-42], pH 插

值图则根据美国盐渍土分级及中国黄淮海平原盐渍土分类分级指标中的 pH 项分为 5 个等级^[41-42], SAR 插值图则默认划分 5 个等级。而表 6 为克里金插值预测

误差交叉验证表,从表 6 中可以看出,两层土壤的 pH 插值误差均较小,插值效果较为理想,而 SAR 的插值精度相对较差,EC_{5:1} 插值误差介于两者之间。

表 6 克里金插值预测误差交叉验证表
Table 6 Cross-validation of Kriging interpolation error

土层(cm)	盐渍化参数	预测误差均值	预测误差均方根	平均预测标准差	平均标准差	标准均方根预测误差
0~20	EC _{5:1}	-0.083 1	1.693 4	2.402 1	-0.044 1	0.746 6
	pH	-0.000 2	0.279 7	0.260 9	-0.000 9	1.072 0
	SAR	0.537 7	7.014 2	11.310 2	-0.004 9	0.782 4
20~40	EC _{5:1}	0.044 4	1.093 9	1.506 2	-0.048 0	0.833 6
	pH	0.000 4	0.277 4	0.260 6	0.001 7	1.064 6
	SAR	0.586 4	7.165 2	10.325 6	-0.023 1	0.982 0

从 EC_{5:1} 插值图(图 2)可以看出,垦利县境内 0~20 cm 土层土壤 EC_{5:1} 普遍高于 20~40 cm 土层,呈现出土壤盐分表聚现象,二者 EC_{5:1} 最高值都出现在东南地区,这是因为这一片地区为沿海滩涂,海水入侵比较严重。而垦利县西部胜坨镇及相邻区域盐分相对比较低,特别是 0~20 cm 土层土壤 EC_{5:1} 最低点出现在该区域,这是因为此处土地利用较为科学,灌排措施合理。20~40 cm 土层土壤 EC_{5:1} 最低点出现在东北部,这是因为该区域位于黄河尾间,地下淡水较为丰富。研究区 0~20 cm 土层土壤都达到中度盐化以上,永安镇小部分地区土壤达到了盐土的范围;20~40 cm 土层土壤盐化程度均在中度及中度以下。

从图 2 中可以看出,20~40 cm 土层土壤的 pH 明显大于 0~20 cm 土层,但两层土壤 pH 都表现为西部区域高于东部。若以美国盐土实验室 8.5 的标准划分^[43],两层土壤只有东部少部分区域为非碱化土;而根据王遵亲等^[41]黄淮海平原土壤简化标准来分,全县范围内 0~20 cm 土层土壤均在弱碱化以下,而 20~40 cm 土层在董集乡、胜坨镇、永安镇西南边陲及黄河口镇东部出现弱碱化现象,其他区域均在弱碱化以下。

从两层土壤的 SAR 插值图(图 2)可以看出,0~20 cm 土层土壤 SAR 空间变异性大,从县东南至西北方呈阶梯状递减,沿海区域土壤钠质化很严重;而 20~40 cm 土层土壤 SAR 南部高北部低,变异性相对较小,大值与小值范围明显小于 0~20 cm 土层,但 SAR 平均值要大于表层。造成两层土壤 SAR 空间差异性的主要因素为海水盐分入侵、黄河淡水淋洗以及强烈的土壤水分蒸发。

以上分析显示,在垂直剖面上,0~20 cm 土层土壤盐分含量高,pH 和 SAR 均值较小,土壤盐化较为严重;20~40 cm 土层土壤 pH 和 SAR 均值较大,而盐分含量相对较低,土壤呈现出碱化的趋势。这样

的土壤性质对盐碱土治理改良是非常不利的,因为淋洗作为盐渍土改良的重要措施,土壤的渗透性是决定淋洗效率的重要因素,而 20~40 cm 土层土壤的碱化及钠质化会严重影响土壤的物理结构,降低土壤的渗透能力^[39]。因此,在进行土地利用和盐碱土改良的过程中要区别对待不同深度的土壤,注意深耕翻土,在淋洗土壤盐分的同时要完善排水系统,降低地下水位,同时结合使用化学改良剂改良碱化土壤。

在县域尺度上,沿海地区表层土壤盐分含量及 SAR 极高,而 pH 较低,内陆地区则相反,表现为土壤碱化。治理盐渍土应当统筹规划,不可一概而论,对不同盐渍化程度和不同盐渍化类型的土壤要有针对性的治理措施,例如在治理沿海高盐高 SAR 土壤时要采用盐土的治理手段,在淋洗改良时应选用低矿化度低 SAR 的灌溉水,而淋洗改良内陆地区偏碱化的土壤时,灌溉水的 pH 应当成为首控因素,同时采用咸淡水交替淋洗的模式可以大量节约灌溉淡水。

3 结论及建议

1) 土壤化学参数的经典统计分析表明,垦利县土壤盐分中含量最高的离子为 Cl⁻、Na⁺,土壤盐分主要来自于海水;调查时间段内由于蒸发作用土壤盐分聚集地表,除 pH 外,0~20 cm 土层土壤 EC_{5:1}、SAR 以及各项离子含量均大于 20~40 cm 土层;且除 pH 外,两层土壤各项化学参数的变异性都在中等变异以上,即变异系数大于 0.7。通径分析结果显示,影响 0~20、20~40 cm 土层土壤 EC_{5:1} 的主要化学离子均为 Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺;而土壤盐分化学参数对土壤 EC_{5:1} 的剩余通径系数分别为 0.145 和 0.181,值都相对较大,说明有对 EC_{5:1} 的影响较大的因素没有考虑进去,猜测为 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻。

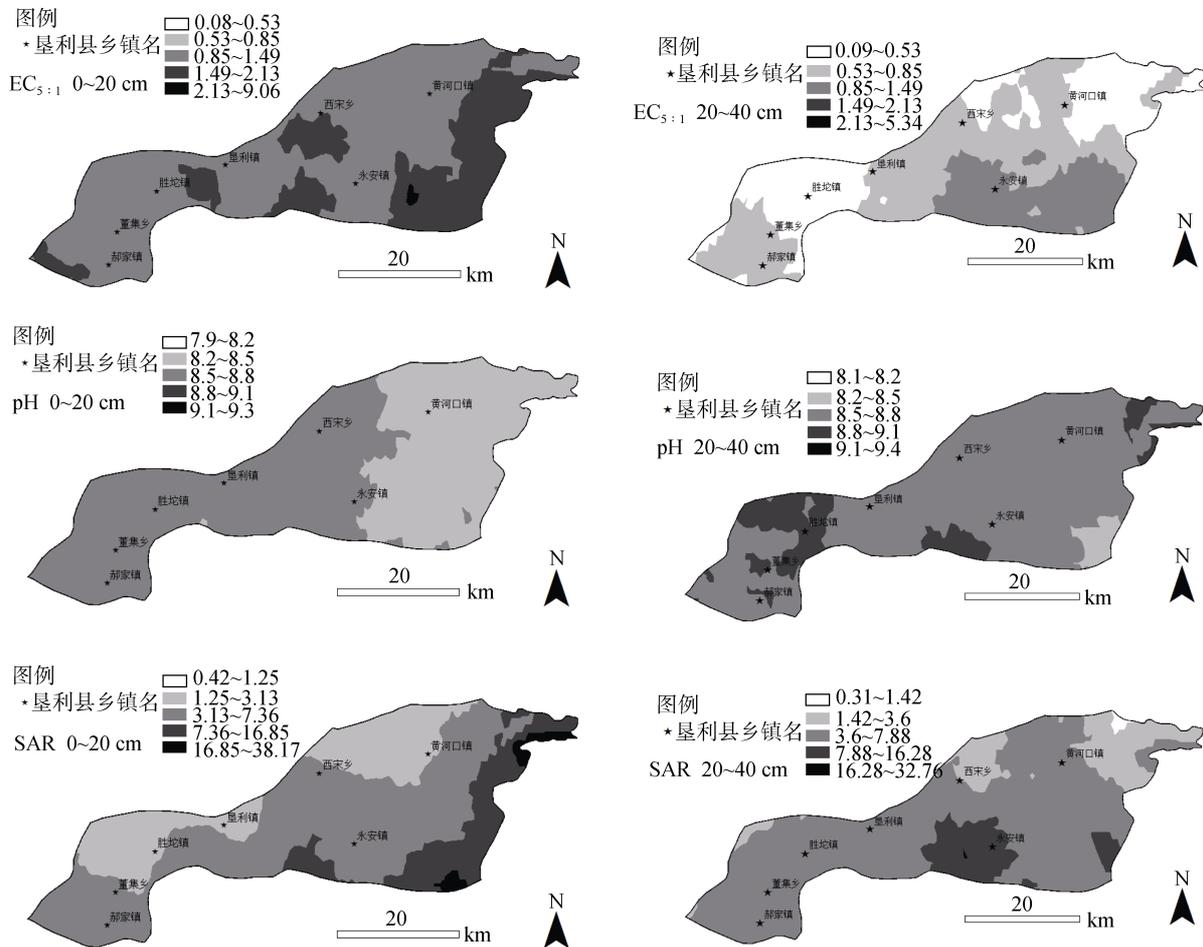


图 2 垦利县 0~20、20~40 cm 土层土壤浸提液 EC_{5:1}、pH 及 SAR 的空间插值分布图

Fig. 2 Spatial interpolation distribution of EC_{5:1}, pH and SAR of 0—20 cm and 20—40 cm soil extraction in Kenli County

2) 土壤盐渍化参数空间插值分析表明,受海水入侵、大气蒸发和黄河来水的影响,0~20 cm 土层土壤 EC_{5:1}、SAR 在县域范围内呈现出东南高西北低的空间分布,海岸线表现出强烈的盐化和钠质化现象;而 20~40 cm 土层南部高北部低,最小值出现在东北部,整体上盐分和 SAR 均小于表层土壤,盐化和钠质化较弱。而土壤 pH 则表现为 20~40 cm 土层高于 0~20 cm,其碱化现象明显。

3) 根据垦利县土壤盐分的面上调查分析结果,在县域范围内治理盐渍化土壤,开发农业种植的过程中需要进行合理的统筹规划,不同区域根据盐渍化轻重程度,采用不同的治理手段,种植与盐渍化程度相适宜的耐盐农作物,对于生态极度脆弱的区域需要重点保护,审慎开发,严禁垦殖。对于同一改良地点的不同深度盐渍化土壤,可根据盐渍化类型的不同,治理时需要区别对待,如有碱化倾向现象的,则要采取一定的化学改良措施,并结合深松,以改善土壤渗透性能。

参考文献:

- [1] Low B. Form, sorm, and spatial modeling in geotechnical engineering[J]. Structural Safety, 2014, 49: 56–64
- [2] Cao Z, Wang Y. Bayesian model comparison and selection of spatial correlation functions for soil parameters[J]. Structural Safety, 2014, 49: 10–17
- [3] Kim J M, Sitar N. Reliability approach to slope stability analysis with spatially correlated soil properties[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(1): 1–10
- [4] Li D, Jiang S, Cao Z, et al. A Multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties[J]. Engineering Geology, 2015, 187: 60–72
- [5] Stewart B A. Advances in soil science. Volume I.[J]. Quarterly Review of Biology, 1985
- [6] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. Advances in Agronomy, 1985, 38(1): 45–94
- [7] Burgess T, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties[J]. Journal of Soil Science, 1980, 31(2): 333–341

- [8] 华孟, 土壤学, 王坚, 等. 土壤物理学: 附实验指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993
- [9] 宋新山, 邓伟, 何岩, 等. 土壤盐分空间分异研究方法及其展望[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 250-254
- [10] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268
- [11] Daniels M. Contemporary statistical models for the plant and soil sciences, by Oliver Schabenberger; Francis J. Pierce[J]. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2002, 98(464): 1080-1082
- [12] 郭笃发. 利用马尔科夫过程预测黄河三角洲新生湿地土地利用/覆被格局的变化[J]. 土壤, 2006, 38(1): 42-47
- [13] Yao R, Yang J, Liu G, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Csa*, 2006, 22(6): 61-66
- [14] Bai J, Wang J, Yan D, et al. Spatial and temporal distributions of soil organic carbon and total nitrogen in two marsh wetlands with different flooding frequencies of the Yellow River Delta, China[J]. *Clean-soil, Air, Water*, 2012, 40(10): 1137-1144
- [15] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江. 不同尺度下土壤盐分空间变异的指示克里格评价[J]. 土壤, 2011(6): 998-1003
- [16] 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[J]. 水土保持学报, 2006(6): 89-94
- [17] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异[J]. 地理研究, 2006(4): 649-658
- [18] 董芝, 刘加珍, 陈永金, 等. 黄河三角洲典型群落土壤盐分空间变异性分析[C] // 中国自然资源学会 2011 年学术年会. 2011
- [19] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲土壤表观电导率空间变异稳健性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009(2): 326-329
- [20] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 基于 EM38 的滨海棉田土壤表观电导率空间变异与利用研究[J]. 土壤通报, 2014(3): 585-589
- [21] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 891-899
- [22] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J]. 水科学进展, 2011(5): 689-695
- [23] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2015(2): 154-161
- [24] 吴向东, 陈小兵, 郭建青, 等. 黄河三角洲农田土壤含水率空间变异特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2013(2): 48-51
- [25] 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(3): 348-353
- [26] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2006(4): 11-15
- [27] 储晓雷, 刘高焕, 刘悦翠, 等. 黄河三角洲土壤离子空间相关性研究[J]. 中国科技信息, 2005(12): 35-57
- [28] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 等. 黄河三角洲土壤氯离子空间变异特征及其控制因素[J]. 地理科学, 2015(3): 358-364
- [29] 陈菁, 傅新, 刘高焕. 黄河三角洲景观变化中人为影响力的时空分异[J]. 水土保持学报, 2010(1): 134-138, 144
- [30] 王娜娜. 黄河三角洲滨海盐渍土养分和盐分空间变异[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2012
- [31] 王红, 刘高焕, 宫鹏. 利用 Cokriging 提高估算土壤盐离子浓度分布的精度——以黄河三角洲为例[J]. 地理学报, 2005(3): 511-518
- [32] 安乐生. 黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2012
- [33] 何庆成. 黄河三角洲地质环境与可持续发展[M]. 北京: 地质出版社, 2006
- [34] 常春艳, 赵庚星, 王凌, 等. 黄河口生态脆弱区土地利用时空变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 226-234
- [35] 朱祖祥. 中国农业百科全书——土壤卷[Z]. 北京: 农业出版社, 1996
- [36] Bhatt G. Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association[J]. *Euphytica*, 1973, 22(2): 338-343
- [37] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010(2): 4-6
- [38] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J]. 土壤学报, 2005(2): 247-252
- [39] 李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 64-72
- [40] 张传奇, 温小虎, 高猛, 等. 莱州湾东岸地下水化学及盐化特征[J]. 海洋通报, 2014(5): 584-591
- [41] 王遵亲等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 573
- [42] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [43] Thorne D W. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils[J]. *Agronomy Journal*, 1954, 46(6):290

On Chemical Parameters Characteristics of Salinity Soil on County Scale in Yellow River Delta

JIANG Mingliang^{1,2}, CHEN Xiaobing^{2*}, SHAN Jingjing², GUO Jianqing³, SUN Yunpeng⁴,
ZHAO Lingyun⁵, XU Ligang¹

(1 *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264000, China*; 3 *School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China*; 4 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 5 *Tianjing TEDA Group Co. Ltd., Tianjing 300457, China*)

Abstract: Kenli County, located at Yellow River Delta, has abundant land resources but with low utilization rate due to the serious inhibition of stern soil salinization which leads to great spatial variation of soil physical and chemical properties. This paper studied systematically the path relationships between soil salt and chemical parameters and the spatial variation characteristics of salinity parameters of 0–20 cm and 20–40 cm soils in Kenli County by the methods of field soil sampling and laboratory chemical analysis. The results showed that salinity of 0–20 cm soil was higher than that of 20–40 cm soil. Except for pH, the variation coefficient of the other studied chemical parameters of the two layer soils were all above medium variant. Cl^- , Na^+ and Ca^{2+} had significant linear correlation with electrical conductivity ($\text{EC}_{5:1}$), indicating they were the direct influential factors on soil salinity. 0–20 cm soil showed strong salinization and sodication along the costaline, both $\text{EC}_{5:1}$ and SAR of 20–40 cm soil were less than topsoil, meaning less soil salinization and sodication. pH in 0–20 cm soil was higher than that of 20–40 cm soil, meaning higher alkalization. The above results can provide not only reliable data bases and empirical formula for soil salinity study but also scientific basis and theoretical guidance for soil salinization control in Kenli County.

Key words: Kenli County; Soil saline chemical parameters; Classical statistics analysis; Spatial variation