

黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布

王瑞燕¹, 孔沈彬¹, 许璐¹, 李玉环¹, 程韦翰¹, 赵恩来²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 潍坊市农业农村技术推广中心, 潍坊 261061)

摘要: 掌握不同地表覆被类型和微地貌特征下的不同深度土壤盐分空间分布规律, 对土壤盐渍化防治具有重要意义。该研究以黄河三角洲入海口为研究区, 在分析不同深度土壤全盐量、盐基离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-}) 空间变异特征的基础上, 通过单因素方差分析不同地表覆被类型和微地貌特征下该区土壤盐分的差异, 并通过地理探测器分析地表覆被类型、微地貌对土壤盐分的交互影响。结果表明: 1) 表层土壤 Mg^{2+} 变异系数达到 1.010 8, 为强变异性, 其余盐基离子均为中等变异性, 且均有强烈的空间相关性, 全盐量与盐基离子均呈现沿海向内陆降低的趋势, 约有 42.57% 的地区为轻度盐化土; 2) 不同地表覆被类型间土壤全盐量与 Na^{+} 、 Cl^{-} 具有显著差异; 3) 不同微地貌类型间 Na^{+} 、 Cl^{-} 具有显著差异; 不同海拔的深层土壤 Na^{+} 具有显著差异; 4) 海拔对土壤全盐量与 Na^{+} 的解释力最强, 地表覆被类型对土壤 Cl^{-} 的解释力最强; 5) 坡向和海拔对土壤盐分的交互作用最强烈, 地理探测器 q 值在 0.545~0.708 之间, 其次是地表覆被类型与坡向, q 值在 0.521~0.613 之间。氯化钠主导该区域土壤盐分空间变异, 不同地表覆被类型和微地貌特征下均呈显著差异, 表层土壤盐分明显高于深层, 坡向与海拔之间的交互作用能够较好地解释该地区土壤盐分空间分布。

关键词: 土壤; 盐分; 空间分布; 地表覆被类型; 地形地貌; 黄河三角洲

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.19.015

中图分类号: S156.4⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-19-0132-10

王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 等. 黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 132-141. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.19.015 http://www.tcsae.org

Wang Ruiyan, Kong Shenbin, Xu Lu, et al. Spatial distribution of soil salinity under different surface land cover types and micro-topography in the Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 132-141. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.19.015 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤盐渍化是指土壤底层或地下水的盐分随毛管水上升到地表, 水分蒸发后, 使盐分积累在表层土壤中的过程。土壤盐渍化是造成土壤退化、粮食减产的一个重要原因, 联合国粮农组织的资料表明全球共有大约 9.5 亿 hm^2 的盐渍土^[1]。中国盐渍土分布十分广泛, 对中国的农业生产产生了不良影响。盐渍土地作为一种重要的土地资源, 其土质改良是当今世界研究的重点和热点, 也是中国耕地后备资源开发与粮食增产潜在保障的基础。

土壤盐分的空间分布具有空间变异性, 系统认识和掌握盐渍土的空间分布特征, 是治理改良盐渍土的基础^[2-6]。土壤盐分的空间分布与区域内的环境因素相关联, 这些因素能在一定程度上反映出当地的土壤盐渍化程度, 研究这些因素的特征, 分析其规律, 能够更加直观地判断一个地区土壤盐渍化的程度。土壤盐分空间分布与环境因素的关联关系引起学者们的广泛关注。研究发现, 土

壤盐分空间分布与地表覆被类型^[7]、地形地貌^[8-9]等的关系尤为密切。如 Yu 等^[10]认为在半干旱农业生产系统中, 随着耕地向草地的转化, 土壤的盐分和盐渍化程度会逐渐降低, 植被覆盖能够有效减少土壤水分的蒸发, 减少深层土壤水分向表层土壤的运移, 从而减少盐分在土壤表层的累积, 并且土地利用类型转换时带来的耕作可以增加土壤孔隙度, 促进土壤可溶性盐向下运移; He 等^[11]认为在沿海盐田建立植被时, 植物群落对土壤盐度的时间和空间变异性有显著影响, 由于不同植被根系分布区域的差异, 同一季节表层土壤盐分呈明显的灌木>树木>草, 在盐碱地的开垦中, 应特别注意植物品种的选择和管理措施; Khatibi 等^[12]认为土壤的盐渍化程度对于植被的生长和分布起着重要的影响, 不同的植被类型反映了土壤含盐量的不同, 土壤含盐量对于植被有着选择作用, 同时某些植被也会一定程度上反作用于土壤含盐量。不同的地形地貌会影响土壤盐分的累积^[13]。杨萍果等^[14]认为在河流冲积扇、河流冲积扇与滨海平原过渡带、滨海平原之间含盐量随着深度增加的变化趋势不同, 且盐基离子的组成也有明显的差异; 张华艳等^[15]认为微地貌和土体构型的变化将会影响到土壤盐分的重新分配, 进而对土壤潜在盐渍化有重要影响; 王红等^[16]认为不同微地貌之间土壤盐分存在着显著差异, 随着采样尺度的增大土壤盐分空间相关性也增大。这些研究表明, 由于不同的微地貌之间存在地下水埋深、地势、土体构型、人类

收稿日期: 2019-08-29 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 山东省重点研发项目(2015GNC110010); “十三五”国家重点研发计划(2017YFD0200702); 山东农业大学创新团队项目(SYL2017XTTD02); 山东农业大学青年教师成长计划经费和青年创新基金(23694)

作者简介: 王瑞燕, 博士, 副教授, 主要研究方向为土地资源遥感。

Email: wry@sdaa.edu.cn

活动强度等方面的差异，会在一定程度上影响土壤盐分累积。

土壤盐基离子富集于土壤表层，易形成碱金属、碱土金属强碱弱酸的盐类，后水解产生碱性离子，使土壤碱化，是影响土壤质量的重要因素。但是目前对于土壤盐分空间变异性的研究大多集中于土壤全盐量上，对于土壤盐基离子空间变异性的研究较少^[2-6]。目前更多的是研究单一影响因素与土壤盐分之间的关系，很少有研究不同因素之间的交互影响^[17-20]。并且对于地形地貌的研究主要集中于微地貌类型对土壤盐分的影响^[21-22]，对于其他地貌特征与土壤盐分之间的关系研究较少，这些特征造成的影响可能与微地貌类型不同。因此本研究通过微地貌类型以及海拔、坡度、坡向等地形因子微地貌特征，结合地表覆被类型，研究这些因素与不同深度土壤全盐量和盐基离子之间的关系。

黄河三角洲地区多种湿地并存，集中连片，其生态环境敏感脆弱，在形成的过程中伴随着海水浸渍入侵^[23]，导致该地区存在大量盐渍化土壤^[24]。由于黄河三角洲形成时间较晚，处于多种生态系统的过渡带，土地利用/覆被变化剧烈^[25]，不同的地表覆被类型能够有效地反映出土壤盐分变化^[26]。且该地区虽然总体上处于平原地带，但是该地区形成于黄河的造陆过程中，具有较丰富的微地貌特征^[27]。因此，本文拟通过表层和深层的土壤全盐量、土壤盐基离子来反映黄河三角洲土壤的基本盐分特征，通过探讨该区不同地表覆被类型、地形地貌下的土壤盐分空间分布差异，以期为该区盐渍土改良利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的土壤样本采集于黄河三角洲入海口处，37°24′~38°10′N，118°15′~119°19′E，东濒渤海，南与东营市东营区毗邻，东北部相接于东营市河口区，随历史地质地貌改变，已具典型三角洲特征。黄河三角洲地区属于暖温带大陆性季风气候，全年气温偏高，冬季少大风、严寒，春季温暖湿润，温度回升快，降水时空分布不均，春季降水少但蒸发强烈，地表易积盐，夏季雨水多，易形成涝灾。黄河三角洲地势低平，河流流速低，加之黄河河流携带泥沙，是中国土地增长速度最快的地区之一，为中国储备了大量的土地后备资源。该区土壤类型主要为盐化潮土和盐土，由于地势低流速低，排水不畅，地下水位高，导致土壤盐碱化严重，影响农业生产和经济发展。

黄河三角洲地区可供使用的地表水资源包括两部分，一是自然降水，二是黄河入流。该区地下水由于矿化度较高而无法使用。黄河水是该地区唯一的客源水，该地区工业、农业及生活用水均来自黄河水。

该地区植被类型复杂多样，植物种类多达 393 种，植被多为旱柳、刺槐、冬枣、柽柳、芦苇等耐盐物种。该地区种植的作物主要有玉米、大豆、冬小麦、棉花等。

1.2 调查与采样

在搜集资料的基础上，于 2006 年 5 月在黄河三角洲

地区确定土壤采样点，选取该区不同地表覆被类型进行 GPS 定位采样。在采样过程中，按照均匀布点法布设了 192 个样点，另外，对每个取样点设 3 个重复以确保准确性，同时在 0~30 cm 表层和 90~100 cm 深层分层取样，采集土壤样品共 1 152 份，土壤样品经处理后于实验室进行土壤样本物理、化学性质测定，分析得到土壤理化性质数据。

通过计数统计发现，采样点多于 3 个的地表覆被类型包括 9 种：I 型-棉田、II 型-芦苇草甸、III 型-裸土、IV 型-刺槐林、V 型-柽柳-翅碱蓬灌丛、VI 型-翅碱蓬群落、VII 型-柽柳-芦苇灌丛、VIII 型-柽柳-白茅-芦苇灌丛、IX 型-麦田，样本数分别为 63、36、10、7、9、6、7、6、4，共计 148 个样本，其余样本还包括柽柳-白茅灌丛、低矮稀疏柽柳灌丛、盐田、芦苇沼泽、杨树林、农田、杨树-棉花套种、冬枣林、鱼塘、苹果园等地表覆被类型，因这些地表覆被类型的采样点不超过 3 个，所以不将其作为研究对象，本文将以此 9 种地表覆被类型为研究对象分析地表覆被类型对土壤盐分的影响，其余样点舍去。在这些地表覆被类型中，除裸土、麦田和芦苇外，其他的均为生长了耐盐碱植被的土地。由于本文中的数据是于 2006 年 5 月在黄河三角洲地区采集的样本，裸土为刚刚耕犁过但还未播种的土地。

1.3 土壤样品处理与测定

将最终采集的土壤样品带回实验室并进行自然风干，去除土壤以外的根系、石块及植物残体等杂质，经过研磨并混合均匀后分别装袋保存，供测定使用。土壤室内分析参照《土壤理化性质分析》及《土壤农化分析方法》，测定每份土壤样本的全盐量、盐基离子（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} ）。

1.4 数据分析

1) 采用 SPSS 22.0 统计软件进行分析，检验数据是否呈正态分布，并进行相应转换使其符合正态分布，应用 ANOVA 单因素方差分析不同地表覆被类型和微地貌特征下土壤全盐量与盐基离子之间的差异，进行 LSD 显著性检验， $P < 0.05$ 为显著差异， $P < 0.01$ 为极显著差异。

2) 将现有的黄河三角洲地区微地貌类型图矢量化形成微地貌类型分布图，并通过 ASTER GDEM Version 3 数字高程模型获取研究区的海拔、坡度、坡向等数据，形成海拔、坡度、坡向的分布图，结果如图 1 所示。

3) 使用 GS+9.0 软件对土壤含盐量数据的半方差函数进行计算、模拟和分析，并在 ArcGIS 软件中进行克里金插值分析。

4) 使用 ArcGIS 软件通过黄河三角洲的数字高程模型 (DEM) 提取研究区内坡度、坡向、海拔数据，每 22.5° 一个方向将坡向分为 16 个方向，每 1° 一个等级将坡度分为 11 个等级，每 1 m 一个等级将海拔分为 18 个等级。

5) 使用地理探测器，选择在不同地表覆被类型和微地貌特征下具有显著差异的土壤盐分特征，分析地表覆被类型和微地貌特征对土壤全盐量与盐基离子的交互作用。

地理探测器正确引用：

[1] Wang JF, Li XH, Christakos G, Liao YL, Zhang T, Gu X & Zheng XY. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science* 24(1): 107-127.

[2] Wang JF, Zhang TL, Fu BJ. 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators* 67: 250-256.

[3] 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器：原理与展望. *地理学报* 72(1): 116-134. [Wang JF, Xu CD. 2017. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica* 72(1): 116-134.]

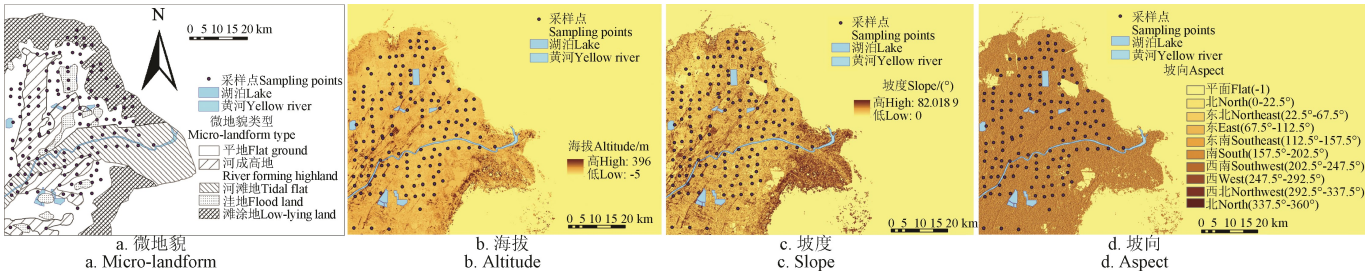


图 1 地形地貌图
Fig.1 Topographic map

2 结果与分析

2.1 土壤全盐量与盐基离子空间分布特征

2.1.1 土壤全盐量与盐基离子空间变异性分析

对于 0~30 和 90~100 cm 土壤盐基离子与全盐量进行统计分析, 盐基离子和全盐量的变异系数均大于 0.1, 其中 0~30 cm 土壤的 Mg^{2+} 的变异系数为 1.010 8, 按照变异系数对土壤盐分变异性进行大致的分类(小于 10%属于弱变异性, 10%~100%为中等变异性, 大于 100%为强变异性), 0~30 cm 土壤的 Mg^{2+} 属于强变异性, 其余均为

中等变异性。造成这种现象的原因可能在于局部土地利用方式、灌溉方式、地貌等因素。随着土壤深度的增加, 这些因素对于土壤全盐量与盐基离子的影响减小, 这表现为表层土壤全盐量与盐基离子的变异系数均大于深层。

为进一步分析其分布特征, 在 SPSS22.0 中对数据进行正态性检验, 土壤数据均不符合正态分布, 对其进行对数变换后, 除 90~100 cm 土壤 Cl^- 为偏态分布以外, 其余均近似符合正态分布。然后在 GS+软件中分析 0~30 cm、90~100 cm 的土壤全盐量的半方差模拟模型及其拟合参数, 具体结果如表 1 所示。

表 1 土壤全盐量与盐基离子半方差函数模型及参数
Table 1 Semi-variance function model and parameters of total soil salt content and base ions

采样深度 Sampling depth/cm	土壤盐分指标 Soil salinity index	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	$C_0/(C+C_0)/\%$	R^2	残差平方和 Residual sum of squares	变程 Range/km
0~30	HCO_3^-	指数模型	0.004 9	0.038 2	12.83	0.846	1.66×10^{-5}	5.910
	Cl^-	球面模型	0.015 5	0.238 0	6.51	0.636	6.39×10^{-4}	6.380
	SO_4^{2-}	高斯模型	0.082 5	0.147 0	56.12	0.805	1.31×10^{-3}	3.862
	Ca^{2+}	高斯模型	0.018 0	0.130 0	13.85	0.874	8.51×10^{-4}	3.984
	Mg^{2+}	高斯模型	0.031 7	0.186 4	17.01	0.755	1.91×10^{-3}	3.585
	Na^+	高斯模型	0.029 8	0.214 6	13.89	0.707	6.29×10^{-3}	5.612
	全盐量	高斯模型	0.024 1	0.129 2	18.65	0.835	6.85×10^{-4}	4.763
90~100	HCO_3^-	指数模型	0.003 1	0.034 9	8.88	0.857	1.83×10^{-6}	4.980
	Cl^-	指数模型	0.015 5	0.171 0	9.06	0.669	1.30×10^{-3}	5.010
	SO_4^{2-}	高斯模型	0.011 3	0.096 6	11.70	0.818	5.03×10^{-4}	3.533
	Ca^{2+}	高斯模型	0.000 1	0.090 7	0.11	0.873	9.60×10^{-4}	4.070
	Mg^{2+}	球面模型	0.005 4	0.105 8	5.10	0.842	2.64×10^{-4}	3.870
	Na^+	高斯模型	0.010 8	0.140 6	7.68	0.831	1.72×10^{-3}	4.832
	全盐量	高斯模型	0.003 0	0.087 8	3.42	0.868	4.19×10^{-4}	4.157

从表 1 中可以看出, 各项指标的决定系数在 0.636~0.873 之间, 均达到了显著水平。全盐量和各项盐基离子的块金值 C_0 的数值均较小, 这说明了研究区内由于随机误差、试验误差、短距离误差所造成的变异较小。 C 表示结构方差, 显示了结构性因素对数据空间变异性的影响, 基台值则表明了系统内总的变异。 $C_0/(C+C_0)$ 可以表明随机因素占总变异的部分, 反映了土壤盐分的空间相关性, $C_0/(C+C_0)<25\%$ 的为强空间相关性, $25\%<C_0/(C+C_0)<75\%$ 的为中等空间相关性, $C_0/(C+C_0)>75\%$ 的为弱空间相关性。不同深度的全盐量和各项盐基离子的块金系数 $C_0/(C+C_0)$ 均小于 25%, 这说明全盐量和盐基离子均呈现强烈的空间相关性, 这些变量的空间变异性主要是由于受结构性因素的影响。

2.1.2 土壤全盐量与盐基离子空间分布

图 2a~2f 分别为 0~30 与 90~100 cm 土壤各盐基离子插值结果。从图中可以看出: 不同深度的 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 含量均较低, 远低于其他 4 种离子的含量; 表层土壤与深层土壤盐基离子的分布大致趋势是一致的, 但是表层土壤盐基离子在局部地区变化较为剧烈, 这可能因为表层土壤盐分不仅受深层土壤盐分影响, 也会受到地表干扰因素的影响; Ca^{2+} 在 0~30 与 90~100 cm 土壤中的分布均比较均匀, 且整体偏低, 大部分地区的 0~30 cm 土壤 Ca^{2+} 在 0.025~0.046 之间, 大部分地区的 90~100 cm 土壤 Ca^{2+} 在 0.013~0.024 之间; Mg^{2+} 在区域内分布差别较小, 主要在黄河入海口存在局部高值区, 其余地区差

距较小；其他盐基离子的分布状况与全盐量的分布状况大致相同： Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 的含量比较接近，0~30 cm 的这 4 种离子在相同区域均存在 0.1 g/kg 以下的低值区，并且其余地区主要在 0.2~0.4 g/kg 之间。

图 2g 分别为 0~30 与 90~100 cm 土壤全盐量空间分布结果。0~30 cm 土壤全盐量在 0.1~5.02 g/kg 之间，而 90~100 cm 土壤全盐量在 0.11~1.77 g/kg 之间，表层土壤全盐量明显高于深层土壤全盐量；该地区大部分地

区有约 42.57% 属于轻度盐化土（1.0~2.0 g/kg），只有约 0.51% 的区域属于中度盐化土（2.0~4.0 g/kg），主要分布在黄河入海口地区，基本没有强度盐化土（4.0~6.0 g/kg）；不同深度的土壤全盐量均明显呈沿海高内陆低、南部低北部高、距黄河越近含量越低的趋势。这是由于该地区土壤盐渍化的成因主要是海水浸渍，而黄河沿岸则是受到黄河带来的大量淡水冲刷，导致其土壤盐分含量较低。

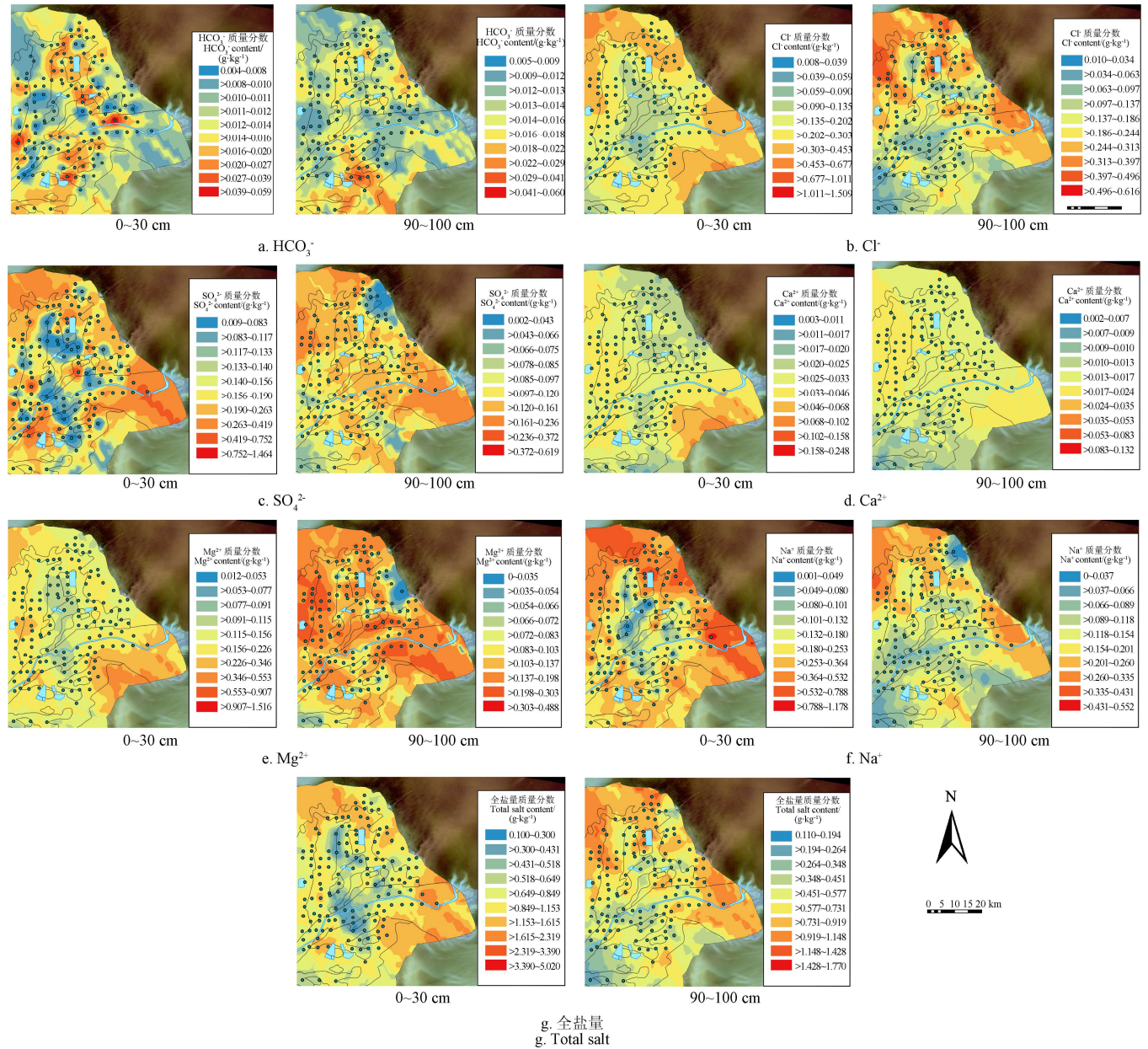


图 2 不同深度土壤全盐量、盐基离子含量克里金插值结果
Fig.2 Kriging interpolation results of total salt content and base ion mass fraction at different depths

2.2 不同地表覆被类型下土壤全盐量与盐基离子分布特征

2.2.1 不同地表覆被类型下土壤全盐量分布特征

1) 0~30 cm 土壤全盐量

从表 2 可以看出不同地表覆被类型下的不同深度土壤全盐量与盐基离子含量的均值，不同地表覆被类型按

土壤全盐量平均值从高到低依次为：翅碱蓬群落、柽柳-芦苇灌丛、柽柳-翅碱蓬灌丛、裸土、芦苇草甸、柽柳-白茅-芦苇灌丛、棉田、麦田、刺槐林。翅碱蓬、柽柳等优势地表覆被类型的土壤全盐量较高。长有芦苇和人工种植植被的地表覆被类型的土壤全盐量都较低。土壤全盐量在不同地表覆被类型之间的差异具

有显著差异 ($P<0.05$)，说明地表覆被类型能明显体现土体表层全盐量的差异。

2) 90~100 cm 土层深度的含盐量

90~100 cm 土层深度不同地表覆被类型的土壤全盐量均值从高到低依次为：柽柳-芦苇灌丛 (VII 型)、裸土 (III 型)、芦苇草甸 (II 型)、翅碱蓬群落 (VI 型)、柽柳-白茅-芦苇灌丛 (VIII 型)、柽柳-翅碱蓬灌丛 (V 型)、刺槐林 (IV 型)、棉田 (I 型)、麦田 (IX 型)。可以看出，地表覆被类型为自然地表覆被类型的深层土壤全盐量高，地表覆被类型为人工地表覆被类型的土壤深层全盐量低。

从土层深度来看，0~30 cm 的全盐量高于 90~100 cm，这是由于该季节降水量少，蒸发强烈，出现了返盐现象。土壤全盐量在不同地表覆被类型之间的差异具有统计学意义 ($P<0.05$)，说明地表覆被类型能明显体现土体深层全盐量的差异，这主要是由于土壤表层全盐量来源于深层土壤。

不同地表覆被类型间翅碱蓬群落和柽柳-翅碱蓬灌丛的土壤中全盐量最高，说明柽柳和碱蓬这两种植物的耐

盐性最强。地表覆被类型为刺槐林与麦田的区域 0~30 cm 土壤全盐量与 90~100 cm 土壤全盐量均明显低于其他地区，这主要是由于小麦为人工种植作物，且耐盐碱性较弱，为了保证其生长一般会选取盐渍化程度较轻的地区种植，刺槐则是具有较好的抗盐性，能够在一定程度上降低土壤盐分，常用于人工种植抗盐碱。而柽柳、芦苇、翅碱蓬等植被具有较强的耐盐碱性，所以能够在盐渍化程度较重的地区自然生长。不同地表覆被类型下土壤盐分存在差异可能一方面是由于地表覆被会受土壤盐分的影响，植被在过高或过低的土壤盐分环境中都难以生长，不同的植被也有各自适宜的生长条件，盐分过高则发展为裸地，另一方面可能是由于部分植被能够吸收土壤盐分，并且能够在一定程度上降低土壤水分蒸发，从而达到降低土壤盐分的效果。

2 个深度的土壤全盐量差异显著性检验结果表明，除裸土、刺槐林、柽柳-翅碱蓬灌丛和麦田外，各地表覆被类型的表层和深层土壤全盐量的差异都达到显著水平。这表明，可以在这 4 种地表覆被类型下，通过监测表层含盐量来获取深层全盐量信息。

表 2 不同地表覆被类型下土壤全盐量与盐基离子含量统计
Table 2 Statistical results of soil total salt content and base ion content under different surface cover types

土壤盐分 Soil salinity	土壤深度 Soil depth/cm	土壤全盐量与盐基离子质量分数 Mass fraction of soil total salt content and base ion content/(g·kg ⁻¹)									P 值 P value
		I 型 Type I	II 型 Type II	III 型 Type III	IV 型 Type IV	V 型 Type V	VI 型 Type VI	VII 型 Type VII	VIII 型 Type VIII	IX 型 Type IX	
Ca ²⁺	0~30	0.043	0.034	0.048	0.03	0.05	0.09	0.033	0.036	0.019	0.153
	90~100	0.019	0.018	0.026	0.02	0.018	0.017	0.022	0.021	0.01	0.545
Mg ²⁺	0~30	0.231	0.225	0.249	0.141	0.347	0.451	0.252	0.211	0.142	0.398
	90~100	0.118	0.129	0.183	0.117	0.115	0.137	0.174	0.122	0.059	0.169
SO ₄ ²⁻	90~100	0.217	0.206	0.208	0.076	0.213	0.233	0.246	0.19	0.099	0.808
	90~100	0.101	0.1	0.159	0.174	0.107	0.112	0.148	0.148	0.116	0.151
HCO ₃ ⁻	0~30	0.015	0.015	0.013	0.015	0.013	0.01	0.012	0.011	0.013	0.284
	90~100	0.017	0.017	0.014	0.013	0.013	0.012	0.011	0.016	0.017	0.424
Na ⁺	0~30	0.205	0.283	0.21	0.068	0.331	0.491	0.49	0.239	0.12	<0.001**
	90~100	0.13	0.227	0.187	0.155	0.198	0.191	0.31	0.187	0.167	<0.001**
Cl ⁻	0~30	0.245	0.322	0.287	0.148	0.502	0.788	0.517	0.286	0.169	<0.001**
	90~100	0.15	0.257	0.223	0.106	0.21	0.221	0.348	0.167	0.102	<0.001**
全盐量	0~30	0.91	1.02	1.18	0.45	1.29	1.98	1.51	0.92	0.54	0.01**
	90~100	0.51	0.7	0.79	0.56	0.59	0.65	0.99	0.62	0.45	0.028*

注：I 型表示棉田，II 型表示芦苇草甸，III 型表示裸土，IV 型表示刺槐林，V 型表示柽柳-翅碱蓬灌丛，VI 型表示翅碱蓬群落，VII 型表示柽柳-芦苇灌丛，VIII 型表示柽柳-白茅-芦苇灌丛，IX 型表示麦田；**代表 0.01 水平下具有极显著差异，*代表 0.05 水平下具有显著差异，下同。
Note: Type I is cotton field, type II is reed meadow, type III is bare soil, type IV is robinia pseudoacacia forest, type V is tamarix chinensis and suaeda salsa shrub, type VI is suaeda heteroptera community, type VII is tamarix chinensis-phragmites shrub, type VIII is tamarix chinensis-cogongrass-phragmites shrub, and type IX is wheat field; ** means extremely significant difference at 0.01 level, and * means significant difference at 0.05 level, the same below.

2.2.2 不同地表覆被类型下土壤盐基离子分布特征

2 个土层的阴离子中，SO₄²⁻和 Cl⁻远高于其他离子；阳离子中，Ca²⁺含量较低，Mg²⁺的含量与 Na⁺含量比较接近。不同地表覆被类型下不同深度的土壤 SO₄²⁻、Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺占阴阳离子总量在 11%至 38%之间，占比相对较高，且总体上比例较为接近，说明研究区的盐土以硫酸镁和氯化物为主，并且在不同的地表覆被类型下含量会有所差异。Na⁺与 Cl⁻的含量变化情况大致一致，且含量比较接近，由此可知氯化物的主要成分应当为氯化钠。

土壤 Na⁺、Cl⁻含量在不同地表覆被类型间的差异极显著 ($P<0.01$)，Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻和 HCO₃⁻均无统计学差异 (表 3)。与土壤全盐含量的分析结果对比发现，土

壤所含 Na⁺、Cl⁻含量变化与土壤全盐量变化趋势一致，这一现象说明，Na⁺、Cl⁻是造成该地土壤盐渍化时空演变的主控因子，也是决定当地地表覆被类型演替的关键盐基离子。因此，土壤中氯化钠的含量是对该区进行土壤盐渍化监测的指标，以及因地制宜地利用盐渍土的依据。

Na⁺存在显著差异可能是由于植被根系会加速土壤中的 CaCO₃ 溶解，从而提供 Ca²⁺并置换出可溶性的 Na⁺，不同的植被对这一作用的强度影响不同，这导致了不同地表覆被类型下土壤 Na⁺的差异。而 Cl⁻存在显著差异则可能是由于 Cl⁻的性质较为稳定，在土壤中 Cl⁻的迁移主要受到土壤水分的影响，相同条件下土壤含水量越低 Cl⁻含量越高，而不同的地表覆被类型会影响土壤水分的蒸发，

进而影响到土壤中 Cl^- 随土壤水分的运移。

HCO_3^- 在所有地表覆被类型中表层和深层的含量差异均不显著。其他成分除了在裸土、麦田和柽柳-翅碱蓬灌丛中无差异外，在各地表覆被类型中都表现出不同程度的差异性，且达到统计的显著水平。

比较 0~30 和 90~100 cm 土层中的盐基离子发现，各地表覆被类型下的土壤表层中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量均高于底层。其中， Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在 2 个土层中的差异规律基本一致， Ca^{2+} 呈显著差异的地表覆被类型为：棉田、芦苇草甸和翅碱蓬群落， Mg^{2+} 呈显著差异的地表覆被类型为：棉田、芦苇草甸、柽柳-翅碱蓬灌丛和翅碱蓬群落； SO_4^{2-} 呈显著差异的地表覆被类型为：棉田、芦苇草甸、翅碱蓬群落。虽然 Na^+ 与 Cl^- 在不同地表覆被类型下表层或深层土壤中均差异显著，但同一地表覆被类型中 2 个深度的土层中差异大多都不显著。同时， Na^+ 与 Cl^- 在土层中的差异规律并不一致，不同土层中，除了刺槐林和麦田，其他地表覆被类型的 Na^+ 含量均是表土高于底土，但只有棉田、芦苇草甸和柽柳-芦苇灌丛的差异达到显著水平，其他地表覆被类型的土壤中两个土层中的 Na^+ 含量差异不明显。 Cl^- 差异显著的地表覆被类型为：棉田、柽柳-翅碱蓬灌丛和翅碱蓬群落。这些数据意味着，地表覆被影响着盐基离子在土体中运移，这种影响对不

同的盐基离子存在差异。

2.3 不同微地貌特征下土壤全盐量与盐基离子分布

2.3.1 不同微地貌类型下土壤全盐量与盐基离子分布特征
平地、河成高低、滩涂地、河滩地和洼地的样本量分别为 27、62、28、27、4。在两个土层的阴离子中， SO_4^{2-} 和 Cl^- 的含量远高于其他离子。阳离子中， Ca^{2+} 含量较低， Mg^{2+} 的含量与 Na^+ 含量比较接近。不同微地貌类型下不同深度的土壤 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 占阴阳离子总量都在 10% 至 33% 之间，占比相对较高，且总体上比例较为接近，这与不同地表覆被类型下的研究结果相一致。在两个土层中，0~30 cm 土壤的 Na^+ 和 90~100 cm 土壤的 Na^+ 、 Cl^- 在不同微地貌类型间的差异显著， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 均无统计学差异。与土壤全盐含量的结果对比发现，土壤所含 Na^+ 、 Cl^- 含量变化与土壤全盐量变化趋势一致。各类地貌中，平地的全盐量、 Na^+ 与 Cl^- 明显高于其他地区，这可能是由于平地地势较为平缓，地下水流速较慢，有利于盐分累积；河滩地的全盐量、 Na^+ 与 Cl^- 含量最低，这可能是由于黄河带来的大量淡水冲刷造成的。除了洼地由于样本数量较少难以比较，比较 0~30 和 90~100 cm 土层中的盐基离子发现，其余各微地貌类型下的土壤表层中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 含量均高于底层。这表明微地貌类型对盐基离子在土壤中的垂直运移的影响较小。

表 3 不同微地貌下土壤全盐量、盐基离子的比较

Table 3 Comparison of total soil salt content and base ions under different micro-topography

土壤盐分 Soil salinity	土层深度 Soil depth/cm	土壤盐分质量分数 Content of soil salinity/(g·kg ⁻¹)					P 值 P value
		平地 Flat ground	河成高地 River forming highland	滩涂地 Tidal flat	河滩地 Flood land	洼地 Low-lying land	
Ca^{2+}	0~30	0.033	0.044	0.040	0.046	0.030	0.804
	90~100	0.018	0.019	0.021	0.019	0.020	0.725
Mg^{2+}	0~30	0.223	0.261	0.227	0.242	0.102	0.310
	90~100	0.130	0.128	0.133	0.116	0.132	0.978
SO_4^{2-}	0~30	0.197	0.224	0.213	0.180	0.079	0.058
	90~100	0.121	0.119	0.104	0.101	0.130	0.798
HCO_3^-	0~30	0.013	0.015	0.014	0.014	0.021	0.111
	90~100	0.015	0.016	0.015	0.016	0.020	0.689
Na^+	0~30	0.343	0.253	0.224	0.175	0.275	0.002**
	90~100	0.238	0.188	0.126	0.134	0.233	0.002**
Cl^-	0~30	0.388	0.319	0.263	0.269	0.307	0.134
	90~100	0.251	0.200	0.161	0.152	0.234	0.039*
全盐量 Total salt content	0~30	1.162	1.052	0.940	0.927	0.765	0.170
	90~100	0.742	0.634	0.531	0.498	0.713	0.111

2.3.2 不同微地貌特征下土壤全盐量与盐基离子分布特征
表 4 为不同微地貌特征下全盐量、各盐基离子单因素方差分析下的显著性，从表 4 中可以看出，仅有深层土壤 Na^+ 在不同海拔之间呈现显著差异，其余盐基离子与土壤全盐量在不同坡向、坡度、海拔下的差异均不显著，

这说明了地形因素对于深层土壤盐分的影响相对较大，但是该地区地形起伏不大，难以造成较大的差异，而表层土壤全盐量与盐基离子更会受到多方面的干扰因素的影响，很难通过坡向、坡度、海拔等地形反映出当地的土壤全盐量与盐基离子含量。

表 4 不同微地貌土壤全盐量、盐基离子单因素方差分析的显著性

Table 4 Significance of single-factor analysis of variance for total salt content and base ions of different micro-topography

微地貌 Micro-topography	采样深度 Sampling depth/cm	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	全盐量 Total salt content
坡向 Aspect	0~30	0.061	0.396	0.422	0.114	0.078	0.755	0.365
	90~100	0.705	0.402	0.118	0.210	0.116	0.566	0.204
坡度 Slope	0~30	0.270	0.522	0.205	0.771	0.653	0.623	0.562
	90~100	0.938	0.472	0.079	0.147	0.517	0.247	0.258
海拔 Altitude	0~30	0.946	0.706	0.378	0.860	0.949	0.303	0.435
	90~100	0.801	0.195	0.429	0.457	0.105	0.019*	0.073

2.4 地表覆被类型与地形地貌的交互作用

交互作用分析结果如表 5 所示。表 5 中的每一行列交叉处表示两种因子交互作用对土壤盐分特征的解释力, 而相同因子交叉处则表示该因子对土壤盐分特征的解释力大小。从表 5 中可以看到海拔为主导表层与深层土壤全盐量和 Na⁺变化的因子, 而地表覆被类型则为主导表层与深层土壤 Cl⁻空间变化的因子。主导表层与深层土壤全盐量和盐基离子空间变化的交互作用则均为坡向∩海拔, 交互作用类型为非线性增强, 坡向虽然在各项盐分指标中的 *q* 值均较低, 但是这一因子与海拔相互作用

后对土壤盐分的解释力大幅提高, 能够较好的解释该地区的土壤盐分变化, 不同盐分特征之间的 *q* 值在 0.545~0.708 之间。而次强烈的交互作用则均为地表覆被类型∩坡向, 交互作用类型为非线性增强, 不同盐分特征之间的 *q* 值在 0.521~0.613 之间, 仅次于坡向∩海拔, 这说明地表覆被类型对于该地区的土壤盐分演变也起到了相当重要的作用, 仅次于海拔。该区域土壤盐分特征的空间变异并不是由单一地学变量控制, 而是由多项因素共同控制, 其中, 与微地貌的综合特征关联最强, 地表覆被类型次之。

表 5 地表覆被类型与地形地貌的交互作用 *q* 值
Table 5 *q* value of interaction between land cover types and topography

土壤盐分	土层深度 Soil depth/cm	地形地貌 Topography	地表覆被类型 Land cover type	微地貌类型 Micro-landform type	坡度 Slope	坡向 Aspect	海拔 Altitude
土壤全盐量 Total soil salt	0~30	地表覆被类型	0.130				
		微地貌类型	0.237	0.013			
		坡度	0.359	0.138	0.055		
		坡向	0.521	0.399	0.421	0.110	
		海拔	0.462	0.328	0.388	0.545	0.158
	90~100	地表覆被类型	0.112				
		微地貌类型	0.255	0.053			
		坡度	0.498	0.251	0.098		
		坡向	0.584	0.411	0.576	0.131	
		海拔	0.516	0.490	0.473	0.704	0.172
	0~30cm	地表覆被类型	0.194				
		微地貌类型	0.274	0.061			
		坡度	0.452	0.199	0.044		
		坡向	0.587	0.413	0.375	0.078	
		海拔	0.527	0.496	0.476	0.655	0.226
Na ⁺	90~100	地表覆被类型	0.171				
		微地貌类型	0.291	0.114			
		坡度	0.557	0.272	0.088		
		坡向	0.613	0.458	0.491	0.082	
		海拔	0.596	0.565	0.448	0.669	0.197
	0~30	地表覆被类型	0.200				
		微地貌类型	0.355	0.022			
		坡度	0.471	0.145	0.051		
		坡向	0.607	0.471	0.442	0.108	
		海拔	0.578	0.382	0.437	0.615	0.176
Cl ⁻	90~100	地表覆被类型	0.176				
		微地貌类型	0.297	0.056			
		坡度	0.438	0.273	0.070		
		坡向	0.563	0.445	0.539	0.108	
		海拔	0.487	0.394	0.400	0.708	0.127

地表覆被类型或微地貌单一特征与土壤全盐量以及 Na⁺与 Cl⁻的关系虽然不显著,但是考虑两个因子交互作用后的坡向∩海拔、地表覆被类型∩坡向与这些盐分特征的关系却变得显著。这可能是由于不同因子之间的关系并不是简单的线性叠加或者每个因子独立起作用, 而是非线性叠加, 这导致两个因子交互作用下对土壤盐分特征的解释力远大于单一因子。

3 讨 论

尽管全部盐基离子在整个黄河三角洲区域内空间变异性较为强烈, 但是不同地表覆被类型与微地貌类型之间只有全盐量、Na⁺与 Cl⁻存在显著差异。这可能是由于区

域范围广, 影响区域内盐分变化的因素较多, 同一类型下也存在较大的变异性。例如选取棉花地与芦苇草甸这两类地表覆被类型下的点位的 SO₄²⁻含量, 棉花地的 0~30 cm 土壤 SO₄²⁻变异系数为 1.22, 为强变异性, 90~100 cm 土壤 SO₄²⁻变异系数为 0.70, 芦苇草甸的 0~30 cm 土壤 SO₄²⁻变异系数为 0.61, 芦苇草甸的 90~100 cm 土壤 SO₄²⁻变异系数为 0.45, 为中等变异性。但是棉花地 0~30 cm 土壤 SO₄²⁻均值为 0.22 g/kg, 芦苇草甸 0~30 cmSO₄²⁻为 0.21 g/kg, 两者之间不显著性; 棉花地 90~100 cm 土壤 SO₄²⁻均值为 0.10 g/kg, 芦苇草甸 90~100 cm 土壤 SO₄²⁻均值为 0.10 g/kg, 两者之间不显著性。总体上, 不同地表覆被类型或微地貌特征下的土壤盐分特征均呈

现明显的表层高于深层,这与全区域内的结果相一致。这可能是由于五六月份该地区蒸发强烈且降水较少,土壤表层积盐现象严重,各盐基离子均会随土壤水分向表层运移,并累积在表层土壤中。但是从空间分布上看,不同微地貌类型间表层土壤盐分无显著差异,造成这一现象的原因可能是不同的微地貌类型会造成地下水埋深、流速的差异,这会导致土壤盐分累积量存在较大差异,表层土壤盐分受到地表覆被类型、人类活动等干扰因素的影响,在相同微地貌类型之间也会存在较大差异,而深层土壤盐分受此类影响较小,能够反映出不同微地貌类型之间的差异。这与现在的很多研究结果一致。古丽娜尔等^[28]认为土地利用、耕种、灌溉等人类农业活动使土壤表层盐分变化幅度远高于深层;Delpupo 等^[29]认为不同的地貌能够反映所在地的盐分累积的能力,并且根据坡向的不同导致了不同的土壤风化程度,从而导致不同坡向间盐分的不同;杨奇勇等^[30]认为不同的地貌类型会影响地下水埋深、排水条件,地下水埋深较浅、排水条件较差的地区会受到更大的次生盐渍化的威胁。

4 结 论

本研究通过选择黄河三角洲地区典型样地进行野外采样、室内分析及数据统计,对不同地表覆被类型、坡向、坡度、海拔、微地貌类型下的土壤盐分特征进行分析,主要结论如下:

1) 不同深度土壤全盐量与盐基离子含量均呈现较强的变异性,变异系数均大于 0.1,且都有强烈的空间相关性。插值结果显示不同深度土壤全盐量与盐基离子均呈现内陆地区向沿海地区逐渐升高的趋势。并且总体上北部地区高于南部地区。

2) 不同地表覆被类型之间不同深度土壤全盐量与 Na^+ 、 Cl^- 含量均呈现显著差异,不同微地貌类型之间,只有表层土壤 Na^+ 以及深层土壤 Na^+ 、 Cl^- 存在显著差异,而在不同坡度、坡向、海拔间土壤全盐量与盐基离子均不存在显著差异。

3) 氯化钠主导了不同地表覆被类型与微地貌类型之间的土壤盐分演变。不同地表覆被类型或微地貌类型之间的土壤盐分的空间变异特征与全区域的结果有所不同,全区域的土壤全盐量与盐基离子均有较强烈的变异性,而地表覆被类型、微地貌类型之间只有 Na^+ 、 Cl^- 和全盐量存在显著差异。并且由于季节性积盐,导致该地区不同的地表覆被类型或微地貌特征下均呈现明显的表层土壤盐分高于深层土壤盐分。

4) 地表覆被类型与微地貌特征的交互作用能够较好的解释该地区土壤盐分空间分布。只考虑单因子的情况下,对研究区土壤全盐量以及 Na^+ 含量解释力最强的是海拔因子,最大交互作用 q 值为 0.226,对土壤 Cl^- 解释力最强的是地表覆被类型,最大 q 值为 0.200,单一因子对土壤盐分空间分布的解释力较弱。但是分析因子交互作用,海拔与坡向因子的交互作用对土壤全盐量以及 Na^+ 、 Cl^- 的交互作用解释力最强, q 值在 0.545~0.708 之间,其次为地表覆被类型与坡向, q 值在 0.521~0.613 之间,能够

较好的解释该地区土壤盐分的空间分布。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Zhengjun, Zhuang Jingjing, Zhao Anping, et al. Types, harms and improvement of saline soil in Songnen Plain[C]/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 322(5).
- [2] 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24. Zhang Yuanpei, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [3] Wang Yugang, Deng Caiyun, Liu Yan, et al. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 621: 177-185.
- [4] Yao Rongjiang, Wang Xiujuan, Wu Danhua, et al. Geostatistical monitoring of soil salinity for precision management using proximally sensed electromagnetic induction (EMI) method[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(20): 1362.
- [5] 刘继龙, 刘璐, 马孝义, 等. 不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 305-312. Liu Jilong, Liu Lu, Ma Xiaoyi, et al. Spatial variability of soil salt in different soil layers at different scales[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 305-312. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈星星, 张江辉, 才仁加甫, 等. 新疆干旱地区土壤盐分空间变异特征研究: 以库尔勒三十一团为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 108-114. Chen Xingxing, Zhang Jianghui, Cai Renjiafu, et al. Study on spatial variability of soil salinity in arid area of southern xinjiang: a case study on 31th regiment of korla[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 108-114. (in Chinese with English abstract)
- [7] Bui E N. Soil salinity: A neglected factor in plant ecology and biogeography[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 92: 14-25.
- [8] El-Keblawy A, Abdelfattah M A, Khedr A A. Relationships between landforms, soil characteristics and dominant xerophytes in the hyper-arid northern United Arab Emirates[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 117: 28-36.
- [9] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 869-873. Yang Fan, Zhang Guangxin, Yin Xiongrui, et al. Spatial variability of soil salinity and alkalization and its correlation with mic-topography in the west of songnen plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(6): 869-873. (in Chinese with English abstract)
- [10] Yu Pujia, Liu Shiwei, Yang Hongtao, et al. Short-term land use conversions influence the profile distribution of soil salinity and sodicity in northeastern China[J]. Ecological Indicators, 2018, 88: 79-87.

- [11] He Bin, Cai Yongli, Ran Wenrui, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field[J]. *Catena*, 2015, 127: 129-134.
- [12] Khatibi R, Soltani S, Khodaghali M. Effects of climatic factors and soil salinity on the distribution of vegetation types containing *Anabasis aphylla* in Iran: A multivariate factor analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(2): 36.
- [13] Marzieh M, Mahdi N, Saeed N, et al. Relationship between landform and soil salinity in the surface and subsurface soils (case study: Southeast of Fars Province, Iran)[J]. *Modeling Earth Systems and Environm*, 2016, 2(1): 16.
- [14] 杨萍果, 杨苗, 毛任钊. 海河低平原不同地貌土壤盐分特征研究[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 285-288.
Yang Pingguo, Yang Miao, Mao Renzhao. Study on soil salt characteristics of different landforms in low Haihe River plain[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 285-288. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 黑龙江流域微地貌与地下水埋深对土壤潜在盐渍化的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 83-90.
Zhang Huayan, Niu Ling'an, Hao Jinmin, et al. Effect of micro-topography and groundwater depth on soil potential salinization in heilonggang basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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, 25(4): 649-658.
Wang Hong, Gong Peng, Liu Gaohuan. Multi-scale spatial variations in soil salt in the Yellow River Delta[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 649-658. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐海量, 张沛, 赵新风, 等. 河水漫溢干扰对土壤盐分的影响: 以塔里木河下游为例[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 1-6.
Xu Hailiang, Zhang Pei, Zhao Xinfeng, et al. Effect of river-flooding on soil salinity in lower reaches of Tarim River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王丹丹, 于志同, 程猛, 等. 渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 349-357.
Wang Dandan, Yu Zhitong, Cheng Meng, et al. Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 349-357. (in Chinese with English abstract)
- [19] Abliz A, Tiyyip T, Ghulam A. et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 260.
- [20] 杨学涛, 李品芳, 侯振安, 等. 玛纳斯河流域不同地貌单元弃耕地土壤盐分差异研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1241-1246.
Yang Xuetao, Li Pinfang, Hou Zhenan, et al. Temporal and spatial variability of soil salinity in deserted cropland as affected by landform in the Manasi river valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1241-1246. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘洪蓬. 罗布泊“大耳朵”地区地貌类型与盐分分布关系的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.
Liu Hongpeng. Study on the connection of geomorphic types and salt distribution in the Big Ear Area of Lop Nur Lake[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李玉义, 张风华, 潘旭东, 等. 新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 60-64.
Li Yuyi, Zhang Fenghua, Pan Xudong, et al. Changes of salt accumulation in soil layers with different landforms in Manas River Valley in Xinjiang Region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 60-64. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曹建荣, 徐兴永, 于洪军, 等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征与演化[J]. *海洋科学*, 2014, 38(12): 78-85.
Cao Jianrong, Xu Xingyong, Yu Hongjun, et al. Research on the variation and evolution of groundwater chemistry in the Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(12): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1377-1385.
Lü Zhenzhen, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1377-1385. (in Chinese with English abstract)
- [25] 汪小钦, 王钦敏, 励惠国, 等. 黄河三角洲土地利用/覆盖变化的微地貌区域分异[J]. *地理科学*, 2008, 28(4): 513-517.
Wang Xiaoqin, Wang Qinmin, Li Huiguo, et al. Spatial pattern of LUCC in different micro-geomorphic types of Huanghe River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 513-517. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张成扬, 赵智杰. 近 10 年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(1): 151-158.
Zhang Chengyang, Zhao Zhijie. Temporal and spatial change of land use/cover and quantitative analysis on the driving forces in the Yellow River delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(1): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5183-5190.
Liu Yanli, Li Chenliang, Gao Mingxiu, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5183-5190. (in Chinese with English abstract)
- [28] 古丽娜尔·哈里别克, 海米提·依米提, 努尔模达·达拉拜, 等. 于田绿洲典型区域土壤盐分空间分异规律研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 28-32.

- Gulnar-Hailbek, Hamid-Yimit, Nuermoda-Dalabai, et al. A study on spatial heterogeneity of soil salinity in the typical area of Yutian Oasis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 28-32. (in Chinese with English abstract)
- [29] Delpupo C, Schaefer C E G R, Roque M B, et al. Soil and landform interplay in the dry valley of Edson Hills, Ellsworth Mountains, continental Antarctica[J]. Geomorphology, 2017, 295: 134-146.
- [30] 杨奇勇, 杨劲松, 李晓明. 不同阈值下土壤盐分的空间变异特征研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1109-1115.
- Yang Qiyong, Yang Jingsong, Li Xiaoming. Spatial variability of soil salinity research under different thresholds[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1109-1115. (in Chinese with English abstract)

Spatial distribution of soil salinity under different surface land cover types and micro-topography in the Yellow River Delta

Wang Ruiyan¹, Kong Shenbin¹, Xu Lu¹, Li Yuhuan¹, Chen Weihai¹, Zhao Enlai²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Agricultural and Rural Technology Extension Center of Weifang, Weifang 261061, China)

Abstract: Strong seawater immersion usually determines the formation of the Yellow River Delta and the land-making process of the Yellow River. The soil is generally rich in soluble salt, due to the groundwater is highly mineralized during the formation process. The salinization situation can deteriorate into full-scale ecological system in recent years. It is necessary to analyze the distribution characteristics of soil salinity in this area, further to clarify influence factors, such as surface cover types and landform features, in order to effectively control soil salinization, and prevent potential salinization as the chemical elements increased in soil. Taking the Yellow River Delta estuary as the research area, this study aims to analyze the spatial variation characteristics of total soil salt content and base ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^-) using various geostatistical methods, such as the Kriging interpolation method. A single-factor analysis of variance was used to calculate the differences in soil salinity in the area under different surface cover types and micro-landform features. Geodetectors were also used to explore the interaction effect between the soil salinity and some parameters, including the land cover type, landform type, slope, landscape, and altitude in the area. The results show that the coefficient of variation of surface soil Mg^{2+} reached 1.0108, indicating a strong variability. The rest of base ions indicated a medium variability with a strong spatial correlation. There was a decrease from coastal to inland for both the total salt content and base ions. About 42.57% area was slightly saline soil, whereas, only 0.51% was moderately saline soil. The total salt content in soil was significantly different from the content of Na^+ and Cl^- among different surface cover types. The single-factor ANOVA results demonstrated that the content of Na^+ and Cl^- in the surface and deep soil reached 0.00, indicating a very significant difference, whereas, the total salt content of surface soil was 0.01, reaching a very significant difference, and the total salt content of deep soil was 0.028 to reach a significant difference. There were significant differences in the content of Na^+ and Cl^- between different types of micro-landscape. The results of single-factor analysis of variance for Na^+ in the surface and deep soils were both 0.002, reaching a very significant difference, while the analysis of Cl^- in the deep soil was 0.039, reaching a significant level of difference. The deep soils at different altitudes have significant differences in Na^+ . The altitude has the strongest explanatory power for total soil salinity and Na^+ , and the surface cover types have the strongest explanatory power for soil Cl^- . The slope direction and altitude have the strongest effect. The interaction of soil salinity was the strongest, where the q value was between 0.545 and 0.708, followed by the surface cover type and slope aspect, where and the q value was between 0.521 and 0.613. Both types of interaction can be used to better explain the change characteristics of soil salt. Therefore, the characteristics of soil salinity can be served as an indicator for the types of surface cover and micro-topography, while these factors, including the altitude, slope direction, and types of surface cover, can also pose a strong impact on the soil salinization under the interaction.

Keywords: soils; salinity; spatial distribution; surface cover types; topography; Yellow River Delta