

基于地理加权回归的莱州湾南岸土壤盐渍化与环境因子的关系研究

蒙永辉,王集宁

山东省地质环境监测总站,济南,250014

内容提要:选取莱州湾南岸为研究区域,系统采集了111个表层土壤样品,测定了土壤全盐量以及 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 等8种土壤盐分离子的含量,运用多元统计分析以及地理加权回归模型等方法,分析了莱州湾南岸土壤盐渍化的影响因素。结果表明:①研究区土壤以盐土为主, Cl^- 的浓度和变异系数远远高于其他盐分离离子,在土壤表层的累积十分显著,氯化物在土壤中最为活跃。②土壤含水率、土壤干容重、土壤有机质、植被覆盖率与土壤盐渍化程度之间出现了高相关性,拟合精度高。③气温、降水、地下水埋深、地下水矿化度表现出中等相关性,拟合精度较高。④数字高程模型(DEM)、高差、土壤粒度、土壤pH表现了一般相关性,拟合精度一般。

关键词:莱州湾南岸;土壤盐渍化;多元统计;地理加权回归模型;耦合度模型

土壤盐渍化的问题是关系到自然环境和可持续发展的战略问题(王飞等,2010)。而土壤盐分是影响土壤特征的一项重要因素。研究土壤盐分的空间特征是了解、管理和改良土壤的关键,也有利于土壤盐渍化的防治。土壤特性是一种区域化的变量,同时土壤特性也具有地质结构的特性和统计学的随机特性,空间统计学方法在分析土壤的空间分布方面成为最有成效的方法之一(李明辉等,2004;李晓燕等,2004;刘付程等,2004),在探索土壤变异规律上也很有成效。空间统计学方法不仅可以有效地揭示土壤属性变量在空间上的分布、变异以及相关的特征(赵瑞峰等,2008),而且还可以将土壤的空间分布格局与土壤的生态过程联系起来,从而可以有效地解释土壤特性的空间分布格局以及对土壤对其赋存的生物的生态过程与功能的影响。近年来,国内外对不同尺度下土壤盐分的空间变异的研究开始逐渐增多。在国内,自由路等(1999)较早研究了黄淮海平原土壤中的盐分及其组成的空间变异特征,并将影响该区域土壤盐分分布的因素划分为两类——稳定因素和随机因素,姚荣江等(2006)、杨劲松等(2006)、王红等(2006)分别对黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异特征、合理采样数目及CoKriging法估值进行了研究,揭示土壤盐分空间变异的控制因素。在目前利用地统计学方法并结合GIS技术来

研究土壤中盐分以及其他元素空间变异特征已成为土壤科学研究的热点之一(陈广泉等,2012)并可以把空间分布格局与生态过程相结合(Rossi et al., 1992)。

针对莱州湾的环境问题已有很多研究成果。杨巧凤等(2016)通过对莱州湾南岸卤水稳定同位素和地球化学特征的研究,并进一步分析了卤水的形成机理和盐分来源;高茂生等(2015)分析了莱州湾南岸地下卤水形成的古地理条件;刘文全等(2014)采用统计学方法,分析了莱州湾南岸土壤盐分离子的空间分布以及盐渍化类型。可见莱州湾南岸的盐渍化现象具有较高的典型研究意义。

近年来GIS技术发展较快,为土壤盐分空间变异的研究提供了较为准确、便捷的工具(宋新山等,2001),基于此,本文通过建立地理加权回归模型研究莱州湾南岸土壤中盐分的空间分布以及与环境因素之间的关系,从而为该区域盐渍土的治理和改良提供科学的依据,同时对本区域的水土资源的保护和可持续利用具有十分重要的现实意义。

1 研究区概况

研究区总体位于莱州湾南岸的弥河下游与潍河下游之间,地理坐标介于 $119^{\circ}0'00''E \sim 119^{\circ}30'00''E$, $36^{\circ}40'00''N \sim 37^{\circ}20'00''N$ 之间,行政区划上属于潍坊

注:本文为山东省国土资源厅地质勘查项目(编号:鲁勘字[2011]14号)的成果。

收稿日期:2017-12-10;改回日期:2018-07-17;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.010

作者简介:蒙永辉,男,1980年生,高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质研究工作。Email:mengyonghui1122@126.com。

市管辖,包含寿光市、寒亭区和昌邑市,研究区总面积约为 3616 km²。莱州湾南部滩涂辽阔,多沙土浅滩,由洪积、冲积平原,向北过渡到冲积平原,地貌以平原为主,地势由南向北倾斜。气候上,莱州湾南岸属北温带季风区,冬冷夏热,四季分明。年平均降水量为 655.8 mm,总体上呈现由南向北递减的趋势,平均蒸发量为 1942.3 mm。由风暴潮造成的海水倒灌,是潍坊北部地区的较为严重的灾害之一。

2 数据与方法

2.1 采样与分析方法

为了分析研究区内土壤盐分的分布规律,选取土地覆盖类型合理,并且受人为因素影响较小,能够较好反映莱州湾南岸土壤盐分特点的区域进行采样研究。在研究区内共布设 111 个采样点,取样范围(119°0'00"E~119°30'00"E,36°40'00"N~37°20'00"N)(图 1),取样面积 3616 km²,运用遥感图像和 GPS 等工具进行选点和采样工作。综合考虑研究区的地貌、作物种植等条件进行土壤采样,每个土壤样点取 0~20 cm 土层土样,以此分析土壤表层盐分的分异规律。

2017 年 6 月~8 月进行实地采样,获取样品前用 GPS 确定采样点位置并记录采样区域的作物类型,在以采样点为中心在半径为 1 m 的范围内取 2 处土样,并均匀混合为一件,每件土样的重量为 0.5 kg,共获取 111 件样品。

对采集的土壤样品在实验室的自然状态下风干,然后经过研磨、过 1 mm 筛等程序对土壤盐分进行检测。土壤检测的环境条件为温度 20~22℃,相对湿度为 46%~54%,进行检测的主要仪器有 TAS-990 原子吸收光度计、TU-1901 分光光度计、50 mm 具塞滴定管、PHS-25 酸度计、ICAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪。其中,采用蒸干法测定土壤中的全盐含量;采用双指示剂中和法测定土壤样品中的 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 含量;采用滴定法测定土壤样品中的 Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 离子;采用原子发射光度法测定土壤样品中的 K⁺、Na⁺ 离子。

2.2 研究方法

对土壤表层的盐分特征进行描述性分析以及多元统计分析,描述性统计包括范围、均值、中值、标准差、变异

系数、峰度和偏度。采用相关性分析、主成分分析和聚类分析等经典的多元统计方法对数据进行处理。以上分析均采用运用 SPSS22.0 软件。

通过建立全局空间回归模型,研究土壤盐渍化与影响因素之间的对应关系,根据空间耦合度分析,建立了莱州湾南岸土壤盐渍化与环境耦合评价指标体系,通过对指标的量化计算,对莱州湾南岸土壤盐渍化和环境因素的耦合程度进行分析。

3 结果与讨论

3.1 土壤表层盐分的统计特征分析

由表 1 可知,研究区土壤全盐量平均为 1749.08 μg/g,离子含量的平均值的排序为 Cl⁻ > Na⁺ > HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺,平均值分别为 483.01、360.07、309.91、237.81、117.37、38.82、30.80 μg/g,主要以 Cl⁻ 和 Na⁺ 为主,土体中的 Cl⁻ 的浓度远远高于其他盐离子,可以看出 Cl⁻ 在土壤表层的累积十分显著,主要原因可能是沿海地区海水入侵导致的盐渍化,使地下水环境逐渐恶化。氯化物为土体中的主要盐分。CO₃²⁻ 在检验中未被检出,且 HCO₃⁻ 的含量低于 Cl⁻,说明碳酸氢盐在区域中处于次要的成分,研究区的土壤以盐化为主。变异函数可以反映随机变量的离散程度;一般认为 CV ≤ 10% 为弱变异性;10% < CV < 100% 为中等变异性, CV ≥ 100% 为强变异。可见除 HCO₃⁻ 外,所有离子均为强变异性,尤其是 Cl⁻ 的变异系数达到 4.99,高于其他离子,Na⁺ 和 Mg²⁺ 次之,变异系数分别为 3.63 和 3.47,表明氯化物在土壤中最活跃。

3.2 地理加权回归模型

表 1 研究区土壤表层盐分描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistical results of soil surface salinity in the study area

元素	范围 (μg/g)	均值 (μg/g)	标准差	变异 系数	峰度 系数	偏度 系数
K ⁺	2.70 ~ 479.95	30.80	68.29	2.22	26.78	5.03
Na ⁺	17.46 ~ 12274.62	360.07	1306.60	3.63	66.19	7.76
Ca ²⁺	22.09 ~ 2053.12	117.37	220.06	1.87	57.05	7.03
Mg ²⁺	4.59 ~ 1068.86	38.82	134.64	3.47	47.82	6.84
Cl ⁻	7.31 ~ 22753.65	483.01	2412.50	4.99	68.98	7.95
SO ₄ ²⁻	11.60 ~ 5747.17	237.81	678.02	2.85	43.12	6.15
HCO ₃ ⁻	138.37 ~ 657.25	309.91	94.22	0.30	1.38	1.01
CO ₃ ²⁻	0.00	0.00	0.00			
全盐量	364.93 ~ 40293.01	1749.08	4373.85	2.50	57.51	7.13

3.2.1 基本模型

在地学空间分析中, n 组观测数据通常是在 n 个不同地理位置上获取的样本数据, 全局空间回归模型就是假定回归参数与样本数据的地理位置无关, 或者说在整个空间研究区域内保持稳定一致, 那么在 n 个不同地理位置上获取的样本数据, 就等同于在同一地理位置上获取的 n 个样本数据, 其回归模型与最小二乘法回归模型相同, 采用最小二乘估计得到的回归参数既是该点的最优无偏估计, 也是研究区域内所有点上的最优无偏估计(刘琼峰等, 2013)。而在实际问题研究中我们经常发现回归参数在不同地理位置上往往表现为不同, 也就是说回归参数随地理位置变化, 这时如果仍然采用全局空间回归模型, 得到的回归参数估计将是回归参数在整个研究区域内的平均值, 不能反映回归参数的真实空间特征。为了解决这一问题, 国外有些学者提出了空间变参数回归模型, 将数据的空间结构嵌入回归模型中, 使回归参数变成观测点地理位置的函数。Fortheringham 等(2002)在空间变异系数回归模型基础上利用局部光滑思想, 提出了地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression Model-GWR)。模型的一般形式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i)x_{i2} + \dots + \beta_p(u_i, v_i)x_{ip} + \varepsilon_{ip}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

公式(1)中, y_i 与 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ 为因变量 y 和解释变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 在位置 (u_i, v_i) 处的实测值; 系数 $\beta_j(u_i, v_i) (j = 1, 2, \dots, p)$ 是关于空间位置的 p 个未知函数; $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是均值为 0、方差为 σ 的误差项。模型参数 $\beta_j(u_i, v_i) (j = 1, 2, \dots, p)$ 是位置相关的, 通常采用加权最小二乘法进行局部估计, 权重一般由观测值的空间(经纬度)坐标决定, 在每一个位置 (u_i, v_i) 处的权重是从 (u_i, v_i) 到其他观测位置的距离的函数。

3.2.2 影响因素的选取与数据处理

莱州湾南岸土壤盐渍化主要受到自然和人为因素的影响。自然因素如气候、地下水埋深和水体矿化度、地面高程高差等对盐渍化有较大影响。考虑前人对滨海地区及干旱地区盐渍化影响因素的实践总结, 结合莱州湾地区自然和人为因素, 我们选取 DEM、地下水埋深、地下水矿化度、降水量、土壤有机质含量、气温、地形起伏度、土壤粒度 ($r < 0.0039$ mm)、NDVI(植被覆盖指数)、土壤 pH、干容重、含水率共 12 个指标来模拟对其莱州湾南岸典型地区盐

渍化的关系, 由于本研究采集的样点中 90% 以上来自农田土, 土壤类型的差异很小, 因此本研究在影响因素指标的选取上直接选取成土母质和土壤类型, 另外人类活动对农田的影响力较强, 所以选择了土壤中有有机质作为解释盐渍化程度的一个变量。

考虑到数据的可获取性及定量化、空间化的要求, 采取土样的路线首先考虑了道路的通达性, 因此主要在莱州湾南岸地区沿南北向的主要河流和公路两旁进行。室内在分析研究区土地利用图、土壤类型图、地质图的基础上, 利用 ArcGIS 10.1 软件在数字底图上进行采样

点的布设; 实地采样过程中, 根据预设采样点周边实际环境进行适当调整, 利用 GPS 确定采样点的实际坐标位置, 本研究在莱州湾南岸地区共获取 111 个样点数据, 样本理化特征经过山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心的进一步分析测试。

表 2 盐渍土含盐量与环境要素关联度分析表

Table 2 Analysis of the correlation between salt content and environmental factors in saline soil

土壤类型	项目	1	2	3	4	5
表层土	关联因子	DEM	降水量	地下水埋深	地下水矿化度	有机质
		0.59	0.77	0.744	0.76	0.60

3.2.3 模型建立

地理加权回归模型(GWR)是对普通线性回归模型(OLS)的扩展, 将样点数据的地理位置嵌入到回归参数之中, 根据选取的影响因素及其参数设定, 即:

$$\ln(YZH) = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_1(u_i, v_i)X_{ij}(DEM) + \sum_{j=1}^k \beta_2(u_i, v_i)X_{ij}(KHD) + \sum_{j=1}^k \beta_3(u_i, v_i)X_{ij}(JSL) + \sum_{j=1}^k \beta_4(u_i, v_i)X_{ij}(YJZ) + \sum_{j=1}^k \beta_5(u_i, v_i)X_{ij}(QW) + \sum_{j=1}^k \beta_6(u_i, v_i)X_{ij}(GC) + \sum_{j=1}^k \beta_7(u_i, v_i)X_{ij}(LD) + \sum_{j=1}^k \beta_8(u_i, v_i)X_{ij}(NDVI) + \sum_{j=1}^k \beta_9(u_i, v_i)X_{ij}(pH) + \sum_{j=1}^k \beta_{10}(u_i, v_i)X_{ij}(GRZ) + \sum_{j=1}^k \beta_{11}(u_i, v_i)X_{ij}(SW) + \sum_{j=1}^k \beta_{12}(u_i, v_i)X_{ij}(HSL) + \varepsilon_i \quad (2)$$

其中 YZH 表示为因变量盐渍化的程度值全盐量,

DEM、KHD、JSL、YJZ、SW、QW、GC、LD、NDVI、pH、GRZ、HSL 作为解释变量分别为高程值、地下水矿化度、地下水埋深、降水量、土壤有机质含量、气温、地形起伏度(高差)、土壤粒度、NDVI、pH、土壤干容重、土壤含水率, β_k (是第 i 个样点的第 k 个回归参数); ε_i 是第 i 个样点的随机误差。

回归系数的计算在 ArcGIS 10.1 软件中应用 GWR 工具实现,其中模型带宽的计算运用 AICc 的方法, ArcGIS 10.1 中提供固定带宽和自适应带宽两种模式,前者是查找最佳距离,后者计算的则为最佳邻近点个数,本研究通过对比验证,发现固定带宽模型能够获得更高的精度。为避免由于多重共线性而导致 GWR 模型出现设计错误,本研究中 DEM 等解释变量均经过标准化处理,最后由 ArcGIS 10.1 中地理加权回归模块实现,模型的拟合度为 0.71,说明 DEM 等自然因素对土壤全盐量是有较强影响的,结果见表 3。在进行土壤盐渍化程度全盐量与各个地球环境因素进行 GWR 局部加权回归时(表 4),土壤含水率、土壤干容重、土壤有机质、植被覆盖率出现了高相关性,决定系数高,气温、降水、地下水埋深、地下水矿化度表现出中等相关性,拟合精度较高,DEM、高差、土壤粒度、土壤 pH 表现了一般相关性,拟合精度一般。

表 3 GWR 模型参数估计及检验结果

Table 3 Parameter estimation and test results of GWR model

模型参数	数值	模型参数	数值
Neighbors	111.00	AICc	264.13
Residual Squares	0.57	R^2	0.72
Effective Number	39.89	R^2 Adjusted	0.57
Sigma	0.66		

表 4 全盐量与各解释变量决定系数结果

Table 4 The coefficient of determination of all salt and various explanatory variables

序号	解释变量	决定系数 (R^2)	序号	解释变量	决定系数 (R^2)
1	DEM	0.08	7	土壤干容重	0.48
2	气温	0.31	8	土壤含水率	0.75
3	高差	0.14	9	降水	0.36
4	土壤粒度	0.19	10	地下水埋深	0.31
5	NDVI	0.45	11	土壤有机质	0.47
6	土壤 pH	0.07	12	地下水矿化度	0.39

3.2.4 土壤盐渍化与环境因素的关系

DEM 与土壤盐渍化水平所综合构建的 GWR 模

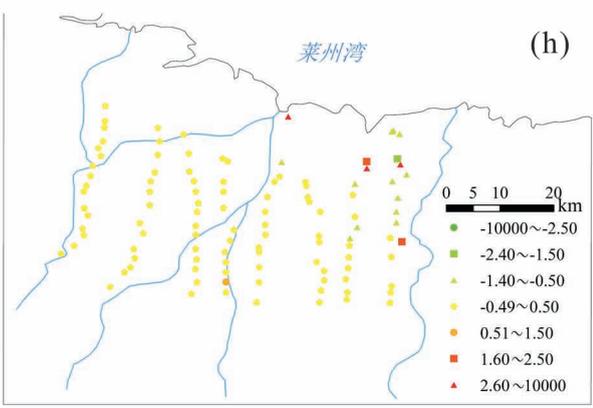
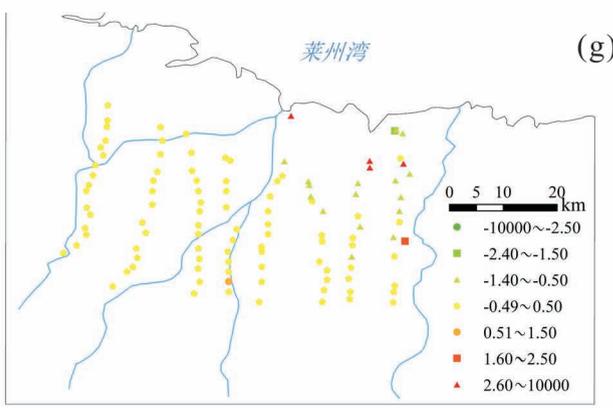
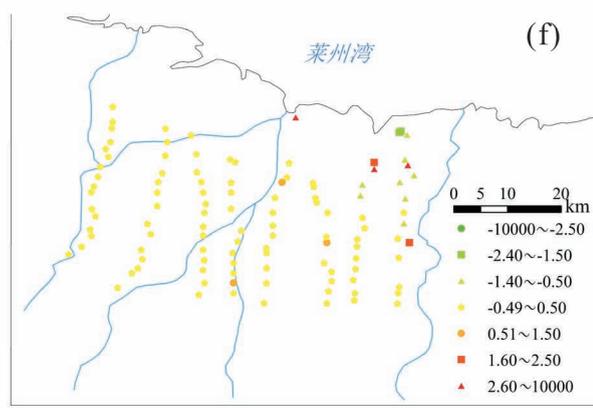
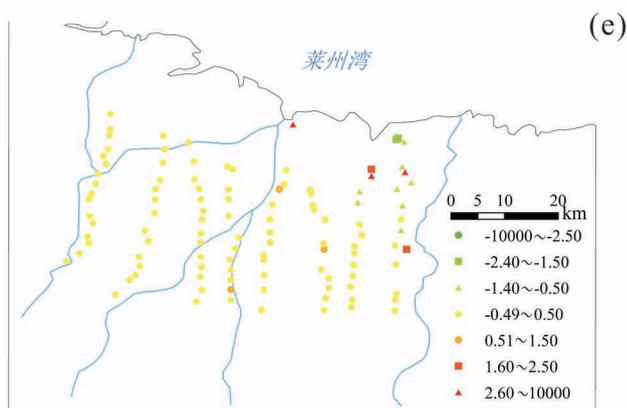
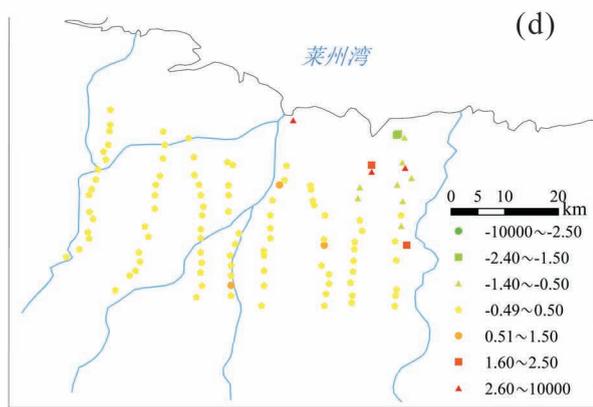
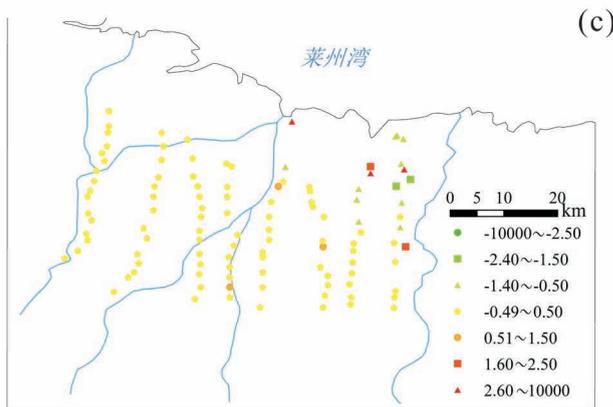
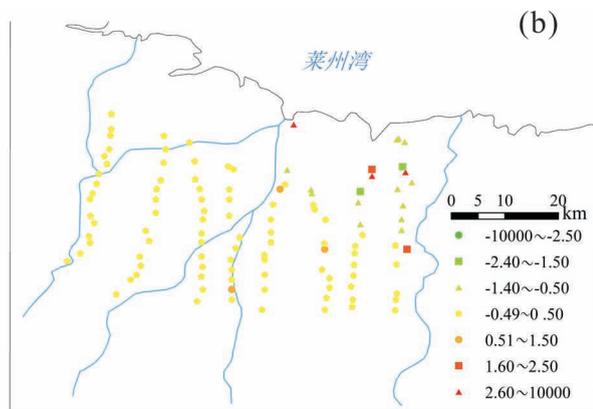
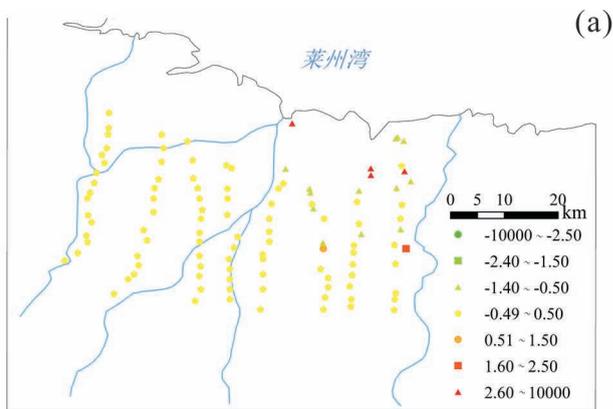
型的局部回归系数分布如图 1a,可以发现大部分样点表现为负相关,少数样点为正相关,体现出局部特征。从空间上来看,南部远离海洋的内陆区正相关为主,北部接近海洋地区负相关为主,从河流入海的流向来看,DEM 也是逐步降低的,回归系数的负相关性越强,在东北部由于盐田的存在,存在个别极高的正相关点。

降水量与土壤盐渍化水平所综合构建的 GWR 模型的局部回归系数分布如图 1b,可以看出样点的局部回归系数主要分布在 -1.5 ~ -0.5 之间,雨水对土壤内的全盐量有冲击减弱作用,但由于区域降水变化并不很明显,所以回归系数较集中于上述负相关的区间内。在研究区东部昌邑区表现更为明显,因为在此区域内的盐渍化程度高,减弱效果更加明显,西部降水对其的影响显著性一般,除受到自然降水的影响以外,寿光的浇灌设施发达,田间水分变化小,也是造成变化不明显的原因。

莱州湾南岸土壤盐渍化受到地下水矿化度的影响较为显著,矿化度与全盐量所构建 GWR 模型之局部回归系数如图 1c,在西部弥河区域局部表现为正值,而在白浪河和潍河区域内局部表现为轻微负相关,弥河区域为重要的蔬菜生产基地,农田灌溉业发达,大量未加处理的地下水直接抽至地表,故相关性较强,而在东部白浪河和潍河区域受自然降雨携带盐分进入地下的影响,局部回归系数表现为负相关。从南北空间分布来看,接近海边,负相关性越强,这受到海水倒灌进入沿海区域的影响。

从地下水埋深与全盐量所构建 GWR 模型之局部回归系数分布(图 1d)可以看出,研究区域内地下水埋深与地表土全盐量呈现负相关关系。李彬等(2006)发现土壤电导率随地下水埋深的增加而减小,变化趋势随地下水埋深的增加而变缓,在地下水矿化度相等时,表层土壤(0~20 cm)含盐量随地下水埋深增加变化幅度最大,土壤含盐量(20~60 cm)随地下水埋深增加变化幅度依次减小,说明土壤表层(0~20 cm)盐分受地下水埋深的影响最大。从空间上来,南部比北部地区负相关的绝对值大,这与研究区域南北方的 DEM 高程有关,这也与前面关于 DEM 值所建立的 GWR 模型结论是相符合的。

谢承陶等(1993)通过监测和试验资料统计分析结果表明,20 cm 土壤盐分与有机质含量呈显著指数函数关系。在图 1e 土壤有机质与全盐量所构建 GWR 模型之局部回归系数分布上可以发现,研究区域内样点主要表现为显著正相关关系,东部昌



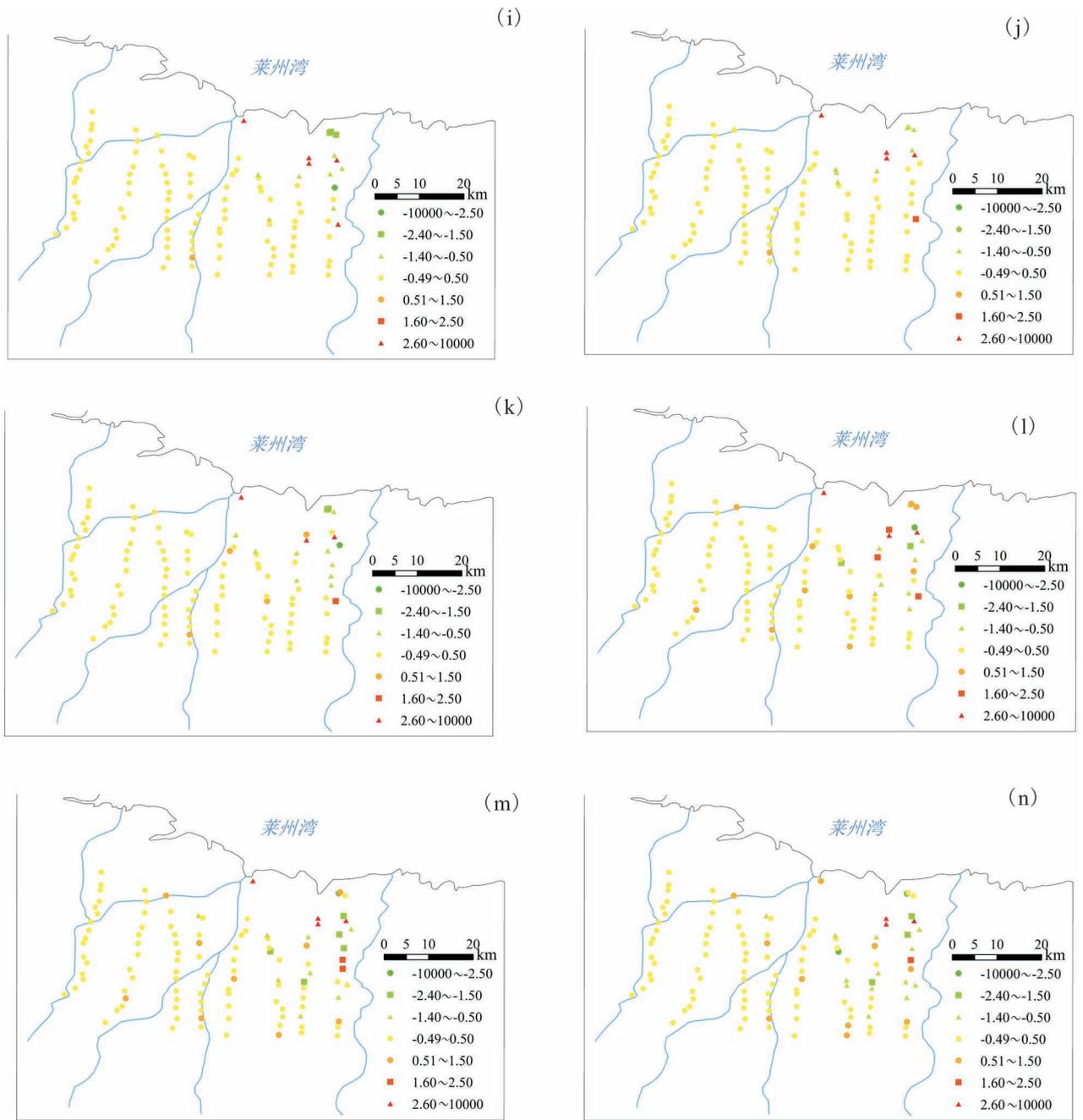


图 1 土壤盐渍化与环境因素所构建 GWR 模型之局部回归系数分布图: (a) DEM; (b) 降水量; (c) 矿化度; (d) 地下埋深; (e) 土壤有机质; (f) 气温; (g) 地形起伏度(高差); (h) 土壤粒度($r < 0.0039$ mm); (i) 植被覆盖度(*NDVI*); (j) 土壤 pH; (k) 土壤干容重; (l) 土壤含水率; (m) DEM、降水量等五自变量; (n) DEM 等 12 种环境因子

Fig. 1 Local regression coefficient distribution map of GWR model constructed by soil salinization and environmental factors: (a) DEM; (b) precipitation; (c) mineralization degree; (d) buried depth of groundwater; (e) soil organic matter; (f) temperature; (g) height; (h) granularity; (i) *NDVI*; (j) pH; (k) dry density; (l) water content; (m) five independent variables; (n) earth environmental factors

邑区潍河区域有机质在地表含量较低,因此在该区域不能把土壤有机质作为影响该地区盐渍化的主要指标。从空间上来,东部弥河区域地形地质适宜

农业发展,土壤有机质含量高,相关性强,西部地区矿产开发影响到土壤有机质含量,故相关性弱。

在地表土壤盐渍化影响因子中,温度的作用较

为滞后和隐蔽,其主要通过影响地表土化学物质转换和微生物的活动。在这些特性的影响下,使得土壤盐分也同样具备这些性质,虽然地表温度较为稳定,差异不是很大,但研究区面积较大,地表高差相对较大。从图 1f 可以看出,温度决定了化学过程和蒸发物理过程的速度,区域内主要与土壤盐分呈现正相关。

地形起伏度即高差,可以在小区域内产生微地貌,对表层土壤的盐分循环产生作用进而产生盐渍化现象。如图 1g 所示,高差与全盐量西部弥河地区呈现正相关,东部白浪河到潍河地区呈现负相关,研究区内的相关绝对值并不大,整个研究区内除少部分区域(潍北五分场附近)受微地貌影响较大之外,其他地区高差在对表层土盐渍化影响中不起到主要作用。

如图 1h 土壤粒度($r < 0.0039$ mm)与全盐量所构建 GWR 模型之局部回归系数分布所示,研究区土壤全盐量与表层土粒度($r < 0.0039$ mm)的比率主要呈现轻度负相关,土壤粒度过小,导致通气透水性差,有机质不容易分解,盐分过度集中于地表,故全盐量高,容易加剧盐渍化的程度。

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index,归一化差分植被指数,标准差异植被指数),也称为生物量指标变化,可使植被从水和土中分离出来。从图 1i 回归系数分布图可以发现,表层土壤中的全盐量与 NDVI 呈现轻微相关性,只有东北部柳疃镇附近出现了很强的相关性,原因是该地区晒盐场居多,田地内农作物较少,而在其他地区内,样点的采集大部分在农田内进行,在加权回归中,更多的体现出的是局部相关性,而不是全局,故总体上体现了轻微的相关性。

土壤 pH 值是衡量土壤酸碱度的重要指标,而土壤的酸碱度又会间接对土壤盐分产生影响,而研究区内大部分的盐渍地都是盐化地与碱化地同时存在的,因此可以看出 pH 值的大小也会直接影响到土壤含盐量的大小。如图 1j 所示,研究区内全盐量与土壤 pH 值存在相关性,西部弥河附近体现出的正相关性要更强一些,这是因为西部地区农业发达,灌溉设施完善,大量地下水矿物质在地表聚集,碱性较强。

土壤干容重是指土壤中去掉水分剩下的岩石的重量。从图 1k 可以看出,空间上西部地区表现为正相关,白浪河东部表现为负相关,土壤水盐在容重大的区域迁移会受到阻滞作用,这与地方的种植业有

关,西部弥河附近地下水抽取到地表,植物的吸收作用较强,表层土壤水分低,干容重相对也高。东部地区主要受到盐田蒸发影响,干容重低但是含盐量高。

作为土壤物理性质的重要组成,土壤含水量对土壤盐分含量产生着重要的影响。固体形式的盐分不能在土壤中自行移动,其必须借助于地下水的流动游走于各土层之间,土壤含水量的高低制约着土壤中可溶性盐进入地下水,并随之到达地表的多少。从图 1l 可以发现,整体上可以看出土壤含盐量与含水率表现出负相关关系。从空间上看,潍河区域要比弥河区域负相关性要强一些,这是因为此区域内地下水埋深较浅。但自南向北却逐渐向正相关过渡,这是由于咸水倒灌所导致。

GWR 模型建立的是局部回归模型,在每个样本点都是对一组参数的估计。图 1m 所建立的参数模型是包含 5 个自变量的影响因素,局部回归参数的大小表征影响因子与土壤盐渍化的相关程度。在莱州湾南岸典型区域内 DEM、矿化度、土壤有机质含量、地下水埋深、降水五项影响因子与土壤盐渍化存在较强联系,负相关强度绝对值在 0.7 附近。从空间变异来看弥河至白浪河区域内回归系数达到中度水平,盐渍化水平受各个因素影响较弱,相对盐渍化水平也低,东部白浪河与潍河区域内回归系数达到较高强度水平,盐渍化水平易波动,受到环境因子影响大,故在对土地开发时应注意盐碱化保护。

将 DEM 等 12 种地球环境因子与全盐量构建 GWR 模型之局部回归系数分布如图 1n 所示,从相关性的绝对值来看,属于中等程度相关,但从单影响因子来看,属于高等程度相关,这说明地球物理环境之间相互作用是复杂的,研究其发生机理又需要从物理化学角度进行。但从地理学角度来看,DEM 等 12 种地球化学环境因子对研究区的盐渍化的产生、发展和演变起到了决定性的作用,当然在每一个小范围,受到微地貌的作用,各个控制因子的影响权重不尽相同,在上文局部分析中可以看出。

3.3 空间耦合度分析

土壤盐渍化与环境是两个极其复杂的综合系统,根据数据的可量化性、资料的可获取性,以及根据莱州湾南岸土壤盐渍化与环境的特征与实际情况,建立了莱州湾南岸土壤盐渍化与环境耦合评价指标体系。通过对指标的量化计算,对莱州湾南岸土壤盐渍化和环境因素的耦合程度进行分析。降水与土壤盐渍化的关系十分密切,降水的渗透、冲刷等作用都会对土壤盐分的流动、富集等造成较大影响。

一般来说,矿化度与含盐量为正相关的关系,通过耦合度计算,两者之间的耦合程度也较高。地下水埋深直接关系到土壤毛细管水能否到达地表,使土壤产生积盐,因而决定土壤的积盐程度。地下水埋深愈浅,土壤盐分含量愈高,地下水埋深较深的区域土壤盐分含量低,说明地下水埋深与土壤盐分含量之间存在交互耦合的关系。

为了消除指标数据间量纲和量级的影响,使用极差正规化法,将原始数据有效归一化在 $[0, 1]$ 之间,便于之后对耦合度进行计算。刘耀彬等(2005)的容量耦合概念及容量耦合系数模型推广,得到多个系统(或要素)相互作用的耦合度模型,即:

$$C_n = \sqrt{\frac{u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_m}{\prod (u_i + u_j)}} \quad (3)$$

式中: C_n 为耦合度; u 为各变量的值。

根据公式,可以得到各环境要素与土壤盐分的耦合度函数,可以表示为:

$$C = \sqrt{\frac{u_i \cdot u_j}{(u_i + u_j)(\bar{u}_i + \bar{u}_j)}} \quad (4)$$

式中: u_i 为各环境因素值; u_j 为土壤的含盐量。

不难证明, $0 \leq C \leq 1$,最大值亦即最佳协调状态;反之,协调度 C 越小,则越不协调,为了更好的划分耦合度的级别,采用中值分段法,将耦合协调度划分为4个区间:①当 $0 < C \leq 0.3$ 时,表明系统处于低度耦合协调;②当 $0.3 < C \leq 0.5$ 时,表明系统处于中度耦合协调;③当 $0.5 < C \leq 0.8$ 时,表明系统处于高度耦合协调;④当 $0.8 < C \leq 1$ 时,表明系统处于极度耦合协调。

通过计算,可以得到环境因素与土壤盐渍化的耦合度(表5)。其中,降水与土壤盐渍化的耦合程度最高,平均值达到了0.9以上,最低值在0.5以上,最高值达到了0.99以上,根据对耦合程度的划分,降水与土壤盐渍化的耦合度处于极度耦合协调。土壤含水率以及土壤干容重与盐渍化的耦合度也达到了0.9以上,处于极度耦合阶段。

矿化度又叫做总溶解固体(TDS),是表示水中溶解组分含量的指标。它包括溶于水中的离子、分子及络合物,但不包括悬浮物和溶解气体。由计算可知,矿化度与土壤盐渍化的耦合程度也较高,均值达到了0.6以上,最低值为0.3以上,最高值达到0.99以上,属于高度耦合协调。

地下水埋深与土壤盐渍化也有较高的耦合程度,耦合度的均值达到了0.5以上,也属于高度耦合

协调,这证明了土壤盐分受地下水埋深的影响较大。有机质、气温、土壤粒度、高差、DEM、土壤pH以及DEM和土壤盐渍化的耦合度较低。

表5 DEM等地球环境因素与土壤盐渍化耦合度表
Table 5 Coupling degree of earth environmental factors and soil salinization

环境因素	耦合度	环境因素	耦合度
土壤含水率	0.921	高差	0.206
降水	0.918	气温	0.200
地下水矿化度	0.610	土壤PH	0.153
地下水埋深	0.562	DEM	0.092
NDVI	0.513	土壤干容重	0.069
土壤粒度	0.240	土壤有机质	0.046

4 结论

(1)研究区土壤以盐土为主, Cl^- 在土壤中的浓度最高,海水入侵是研究区盐渍化的主要原因。 Cl^- 的远远高于其他盐分离离子,在土壤表层的累积十分显著,氯化物在土壤中最活跃。

(2)对影响土壤表层盐分含量的部分因子进行了时间序列分析,结果表明,在时间上,土壤盐分含量与DEM、降水、地下水埋深、NDVI、土壤含水率、土壤粒度呈负相关关系,与气温、地下水矿化度、地下水温度、土壤含水量、土壤pH、土壤有机质、土壤干容重呈正相关关系,且其拟合程度均较好。

(3)在土壤盐分含量的地球环境影响因子中,运用地理加权回归模型进行分析,土壤含水率>土壤干容重>土壤有机质>植被覆盖度(NDVI)>地下水矿化度>降水>地下水埋深>气温>土壤粒度>高差>DEM>土壤pH对土壤盐渍化的贡献率依次减弱,但在潍河流域柳疃镇北部地下水的矿化度对土壤盐分的贡献率较大,主要受海水倒灌影响,而在白浪河流域高里镇北部地区,受地面高程微地貌的影响较大,而其他因素贡献率较小。

(4)通过耦合模型分别对DEM等地球物理环境耦合度进行了计算,结果表明,在自然因子中,除地形因素外,其余各因子与土壤含盐量的耦合度均在0.99以上,属于极协调耦合阶段,地形因属于低协调分离阶段,地下水埋深与土壤盐渍化也有较高的耦合程度,耦合度的均值达到了0.5以上,也属于高度耦合协调,这证明了土壤盐分受地下水埋深的影响较大。有机质、气温、土壤粒度、高差、DEM、土壤pH和土壤盐渍化的耦合度较低。

致谢:感谢潍坊市矿产资源管理中心在野外调查和取样中的帮助和支持;感谢山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心在土壤样品数据分析上的帮助;感谢审稿专家和编辑的有益建议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 自由路,李保国,胡克林. 1999. 黄淮海平原土壤盐分及其组成的空间变异特征研究. 中国土壤与肥料,1999(3):22~26.
- 陈广泉,刘文全,于洪军,陈沈良,徐兴永,赵娜,曹建军. 2012. 基于GIS的莱州湾南岸土壤盐渍化特征分析研究. 海洋科学进展,30(4):501~507.
- 高茂生,郑蕊钰,刘森,王松涛,孔祥淮,赵金明,郭飞. 2015. 莱州湾地下卤水形成的古地理条件分析. 地质论评,61(2):393~400.
- 李彬,王志春,迟春明. 2006. 吉林省大安苏打碱土含盐量与电导率的关系. 干旱地区农业研究,24(4):168~171.
- 李明辉,彭少麟,申卫军,林永标,刘振乾. 2004. 丘塘景观土壤养分的空间变异. 生态学报,24(9):1839~1845.
- 李晓燕,张树文,王宗明,张惠琳. 2004. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局. 地理学报,59(6):503~511.
- 刘付程,史学正,于东升,潘贤章. 2004. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. 地理研究,23(1):63~70.
- 刘琼峰,李明德,段建南,吴海勇,洪曦. 2013. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析. 农业工程学报,29(3):225~234.
- 刘文全,于洪军,徐兴永. 2014. 莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究. 土壤学报 51(6):1213~1222.
- 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 2005. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报,60(2):237~247.
- 吕建树,张祖陆,刘洋,代杰瑞,王学,王茂香. 2012. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价. 地理学报,67(7):109~122.
- 宋新山,邓伟,何岩,闫百兴. 2001. 土壤盐分空间分异研究方法及其展望. 土壤通报,32(6):250~254.
- 王飞,丁建丽,伍漫春. 2010. 基于NDVI-SI特征空间的土壤盐渍化遥感模型. 农业工程学报,26(8):168~173.
- 王红,宫鹏,刘高焕. 2006. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异. 地理研究,25(4):649~658.
- 谢承陶,李志杰,章友生,林志安. 1993. 有机质与土壤盐分的相关作用及其原理. 中国土壤与肥料,(1):19~22.
- 杨劲松,姚荣江,刘广明,孔祥勇,张芳. 2006. 黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其 cokriging 估值. 干旱区研究,23(3):439~445.
- 杨巧凤,王瑞久,徐素宁,李文鹏,王志一,梅建军,丁志磊,杨培杰. 2016. 莱州湾南岸卤水的稳定同位素与地球化学特征. 地质论评,62(2):343~352.
- 姚荣江,杨劲松,刘广明,邹平. 2006. 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,22(6):61~66.
- 赵锐锋,陈亚宁,洪传勋,李卫红,白云岗. 2008. 塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局分析——以岳普湖绿洲为例. 地理研究,27(1):135~144.
- 祖皮艳木·买买提,海米提·依米提,吕云海. 2013. 于田绿洲典型区土壤盐分及盐渍土的空间分布格局. 土壤通报,44(6):1314~1320.
- Bai Youlu, Li Baoguo, Hu Kelin. 1999#. Study on the space variable

- character of soil salt and its component in Huanghuaihai Plain. Soil and Fertilizer Sciences in China,1999(3):22~26.
- Chen Guangquan, Liu Wenquan, Yu Hongjun, Chen Shenliang, Xu Xingyong, Zhao Na, Cao Jianjun. 2012#. Analysis of soil salinization in the southern Laizhou Bay based on GIS. Advances in Marine Science,30(4):501~507.
- Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. 2002. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships. International Union of Crystallography.
- Gao Maosheng, Zheng Yimin, Liu Shen, Wang Songtao, Kong Xianghui, Zhao Jiming, Guo Fei. 2015#. Palaeogeographic condition for origin of underground brine in southern coast of Laizhou Bay, Bohai Sea. Geological Review,61(2):393~400.
- Li Bin, Wang Zhichun, Chi Chunming. 2006#. The relationship between salt content and electric conductivity of soda solonchets in Da'an City, 24(4):168~171.
- Li Minghui, Peng Shaolin, Shen Weijun, Lin Yongbiao, Liu Zhenqian. 2004#. Spatial variability of soil nutrients in a hill-pong landscape. Acta Ecologica Sinica,24(9):1839~1845.
- Li Xiaoyan, Zhang Shuwen, Wang Zongming, Zhang Huilin. 2004#. Spatial variability and pattern analysis of soil properties in Dehui City of Jilin Province. Acta Geographica Sinica,59(6):503~511.
- Liu Fucheng, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Pan Xianzhang. 2004#. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. Geographical Research,23(1):63~70.
- Liu Qiongfeng, Li Mingde, Duan Jiannan, et al. 2013#. Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(3):225~234.
- Liu Wenquan, Yu Hongjun, Xu Xingyong. 2014#. Rules of variation of salt ions in soil profiles in south coastal area of Laizhou Bay. Acta Pedologica Sinica,51(6):1213~1222.
- Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. 2005. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China, 60(2):237~247.
- üLü Jianshu, Zhang Zulu, Liu Yang, et al. 2012#. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City. Acta Geographica Sinica,67(7):109~122.
- Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, and Franz E H. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecological Monographs,62(2):277~314.
- Song Xinshan, Deng Wei, He Yan, et al. 2001#. Methods and prospect on spatial variation of salt in soil. Chinese Journal of Soil Science, 32(6):250~254.
- Wang Fei, Ding Jianli, Wu Manchun. 2010#. Remote sensing monitoring models of soil salinization based NDVI-SI feature space. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26(8):168~173.
- Wang Hong, Gong Peng, Liu Gaohuan. 2006#. Multi-scale spatial variations in soil salt in the Yellow River Delta. Geographical Research,25(4):649~658.
- Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Liu Guangming, et al. 2006#. Spatial variability of soil salinity in the Yellow River delta and its estimation by CoKriging method. Arid Zone Research,23(3):439~445.
- Yang Qiaofeng, Wang Ruijiu, Xu Suning, Li Wenpeng, Wang Zhiyi, Mei Junjun, Ding Zhilei, Yang Peijie. 2016#. Hydrogeochemical and stable isotopic characteristics of brine in Laizhou Bay. Geological

Review,62(2):343~352.

Yao Rongjiang, Yang Jinsong, Liu Guangming, et al. 2006. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,22(6):61~66.

Zhao Ruifeng, Chen Yaning, Hong Chuanxun, Li Weihong, Bai Yungang. 2008. Study on spatial variability and pattern of soil salinity of the oasis in the headstreams of the Tarim River Basin: A case study on Yuepuhu oasis. Geographical Research,27(1):135~144.

Study on Influencing Factors of Soil Salinity in South Coast of Laizhou Bay, Shandong, Based on Geographically Weighted Regression Model

MENG Yonghui, WANG Jining

Shandong Geological Environmental Monitoring Station, Jinan, 250014

Abstract: The south bank of Laizhou bay was selected as the research area, the total salt content of soil was determined and 111 surface soil samples systematically, the contents of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- and CO_3^{2-} were analyzed, and the contents of salt ions were measured. The influencing factors of soil salinization on the south bank of laizhou bay were analyzed by means of multivariate statistical analysis and geographically weighted regression model. The results showed that: the soil in the study area was dominated by salt soil, and the concentration and variation coefficient of Cl^- were much higher than that of other salt ions. The accumulation of soil surface was very significant, and the most active chloride was in the soil; Soil moisture content, dry bulk density, soil organic matter, vegetation coverage and soil salinization degree were highly correlated, and the fitting accuracy was high; There is a moderate correlation between temperature, precipitation, groundwater depth and groundwater salinity, and the fitting accuracy is high; DEM (digital elevation model), height difference, soil particle size and soil pH showed a general correlation, and the fitting accuracy was general.

Keywords: Laizhou Bay south bank; soil salinization; multivariate statistics; geographically weighted regression model; coupling degree model

Acknowledgements: This study was supported by the Department of Land resources of Shandong Province (No. N2011-14)

First author: MENG Yonghui, male, born in 1980, mainly engaged in the research, evaluation, development, utilization and protection of brine resources. Email: mengyonghui1122@126.com

Manuscript received on: 2017-12-10; Accepted on: 2018-07-17; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.010