

滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征

刘文全^{1,2}, 卢芳^{2,3}, 徐兴永^{1,2*}, 付云霞⁴, 付腾飞^{1,2}, 陈广泉^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;

3. 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100;

4. 青岛地质工程勘察院, 青岛 266071)

摘要:为了揭示废弃盐田复垦区棉田土壤盐分和有机质的时空变化特征, 该文利用棉花关键生长节点的土壤采样数据, 采用经典统计学和地统计学相结合的方法, 对土壤盐分和有机质的空间分布特征进行分析。结果表明: 研究区不同时期不同深度的土壤含盐量和有机质含量变幅较大, 二者的变异强度均为中等; 随着时间的变化土壤含盐量和有机质含量均呈现下降的趋势, 各层土壤含盐量与有机质含量相关性程度不高。研究区土壤含盐量与有机质含量均具有中等强度的空间自相关性。Kriging 插值结果表明土壤有机质呈条带状分布, 苗期和花期土壤有机质含量由西向东逐渐增加, 花铃期土壤有机质含量以东北部含量最低, 收获期有机质含量高值区主要集中在西北部和东南部。土壤含盐量的三维空间分布在不同时期不同深度具有相似性, 其空间分布特征总体较为接近; 苗期和花期土壤含盐量高值区出现在东南部方向; 花铃期和收获期土壤含盐量空间分布比较散乱, 呈斑块状分布。研究结果为莱州湾南岸盐田复垦区的盐渍土科学改良、合理利用及农业可持续发展提供技术支持。

关键词: 土壤; 盐; 复垦; 废弃盐田; 土壤有机质; 三维

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.022

中图分类号: S156.4+2 文献标志码: A 文章编号: 002-6819(2019)-0183-08

刘文全, 卢芳, 徐兴永, 付云霞, 付腾飞, 陈广泉. 滨海废弃盐田复垦区土壤盐分和有机质的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 183—190. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.022 <http://www.tcsae.org>
Liu Wenquan, Lu Fang, Xu Xingyong, Fu Yunxia, Fu Tengfei, Chen Guangquan. Spatial variability of soil salinity and organic matter in reclaimed area of abandoned salt pan in coast[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 183—190. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.022 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤盐分一直是世界各国农业生产的主要限制因素之一^[1-3]。目前世界范围内约有 $0.34 \times 10^9 \text{hm}^2$ 的耕地含有盐分, 占耕地总面积的 23%; 约有 $0.56 \times 10^9 \text{hm}^2$ 的耕地为苏打土, 占耕地总面积的 37%^[4], 受盐分影响的土地约占世界土地面积的 3%^[5]。盐分的增加会改变土壤的物理化学性质, 包括土壤结构、渗透系数及离子交换量等。莱州湾南岸是中国最重要的卤盐生产基地, 盐田面积 $4.2 \times 10^4 \text{hm}^2$, 原盐产量占全国的四分之一^[6]。近些年来受开采成本、人工费增加以及产品价格下降等因素影响, 大面积盐田复垦为农业用地。该区常年为晒盐用地, 虽然前期开展了一系列整治措施, 但长期受卤水入渗等影响土壤

中仍含有大量可溶性盐分。土壤的高含盐量一直是该区开展农业复垦最主要的影响因素。因此, 掌握土壤盐分的时空变化规律及其影响因素是该地区进行盐渍土科学改良、合理利用和土地退化防治的必要前提。

土壤中水溶性盐分的定量化分析, 是研究土壤盐分动态、确定土壤盐渍化程度以及进行盐渍土改良应用的关键环节之一。地统计学分析已经被证明是研究土壤盐分空间结构和分布的有效方法^[7-10], 特别是三维地统计方法的应用, 丰富了三维空间变异插值理论和方法, 为精确农业的实施提供定量化的信息。如 Li 等采用三维协同克里格法预测了水稻田土壤盐分的空间变异性^[11]。云安萍等采用三维反距离法研究了田块尺度土壤盐分的空间分布^[12]。Liu 等采用三维普通克里格法预测了黄河三角洲土壤盐分的空间分布^[13]。吴亚坤等研究了新疆伊犁地区三维土壤盐分变化对不同季节的响应^[14]。Li 等利用三维克里格法建立了长三角地区土壤盐分的三维空间分布模型^[15]。

与众多土壤盐分空间变异研究相比, 废弃盐田复垦区土壤盐分的时空变异性鲜有报道。盐田土壤的含盐量一般都在 1.5% 以上^[6], 加之淡水资源匮乏, 无法进行有

收稿日期: 2019-01-16 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目(U1806212、U1606401); 海洋公益性行业科研专项经费项目(2015418012-1)

作者简介: 刘文全, 博士, 助理研究员, 主要从事水土资源保护与溶质运移研究。Email: liuwq@fio.org.cn

*通信作者: 徐兴永, 博士, 研究员, 主要从事海岸带地质灾害监测与评估研究。Email: xuxingyong@fio.org.cn

效地淋盐洗盐,导致农作物生长受到抑制,产量极低^[17-18]。本文针对莱州湾南岸废弃盐田复垦过程中的主要影响因子,以盐田复垦区典型地块作为研究对象,利用三维克里格方法研究不同棉花生育期土壤盐分的三维空间变异特征,探索三维土壤盐分和有机质的响应关系。研究成果将为该区盐渍土改良、合理利用和开发提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省昌邑市柳疃镇灶户村西部盐田区,具体地理位置如图1所示。该区于2012年复垦,地块长约300 m,宽约160 m,利用排盐沟划分为4个小区,每个小区宽约40 m。复垦前的土壤含盐量超过40 g/kg,复垦第一年引水进行大水漫灌压盐处理,后一直种植棉花,但产量极低,目前达到2.25 t/hm²左右,仍属于低产田^[19]。

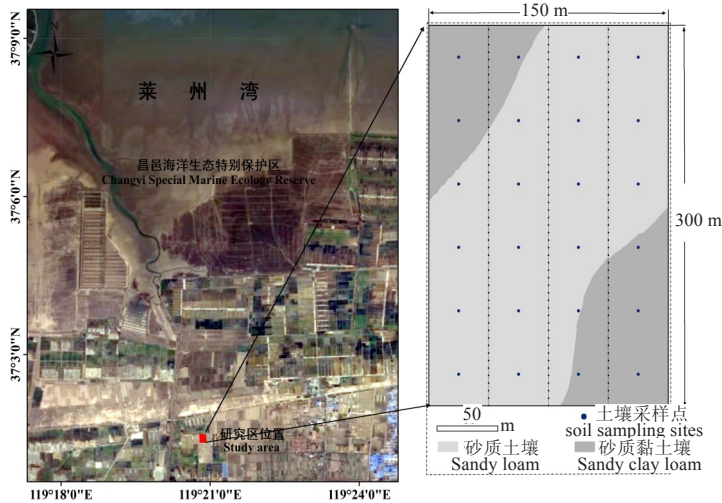


图1 研究区地理位置及采样点分布图

Fig.1 Geographical location of study area and soil sampling sites

1.2 采样设计

采用网格化布点方法,研究区共布设24个采样点,东西方向采样点间距40 m,南北方向采样点间距50 m。所有采样点坐标采用差分GPS进行定位,采样时间为2017年,选择棉花4个主要生育期苗期(5月20日)、花期(7月13日)、花铃期(9月6日)和收获期(10月20日)进行采样。每个剖面按照0~30、30~60和60~90 cm进行分层采样,4个时期共采集土样288个。

1.3 样品处理与分析

所有现场采集土壤样品密封后带回实验室,室内自然风干、磨碎后过2 mm筛后备用。所有土样均制备1:5土水比浸提液,室内测定其电导率EC。土壤含盐量采用重量法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,具体测量方法参考《土壤农业化学分析方法》^[20]。研究表明土壤含盐量与浸提液电导率为正相关关系^[21-22],因此,本文利用前期研究成果获得了研究区土壤含盐量与浸提液电导率之间的换算公式^[6]:

$$S_i = 0.056EC_{1:5} - 0.55 (r^2 = 0.95, P < 0.05, n = 48)$$

式中 S_i 为土壤含盐量,g/kg;EC为1:5土水比土壤浸提液

该区属暖温带半湿润东亚季风区季风气候,四季明显,春季风大干燥,易旱,夏季高温多雨,间有旱灾,秋季温和凉爽,季末易干旱,冬季干冷,雨雪稀少;年平均为11.9℃,年平均降水量660.1 mm,年平均蒸发量1 859.4 mm,平均蒸降比达到3.0左右。土壤类型主要为盐化潮土,土壤质地耕层以砂质壤土为主,东南角和西北角存在部分砂质黏壤土,土壤质地分布特征如图1所示。研究区范围内以盐田为主,部分复垦区域种植棉花等耐盐农作物。研究区2017年地下水埋深一般在5.3~11.0m之间变化,由于该区地下潜水层埋藏有高矿化度卤水,加之缺乏蓄水工程,雨季不能调蓄,非雨季淡水资源紧缺,农田灌溉主要通过地下管网从南部柳疃镇取水(Cl⁻:887 mg/L),利用膜下滴灌来满足作物生长需求,每次的灌溉量为450~600 m³/hm²。研究区棉花种植前期使用了复合肥(525 kg/hm²)和有机肥(600 kg/hm²)。2017年受降雨等因素影响(图2),滴灌系统没有运行。

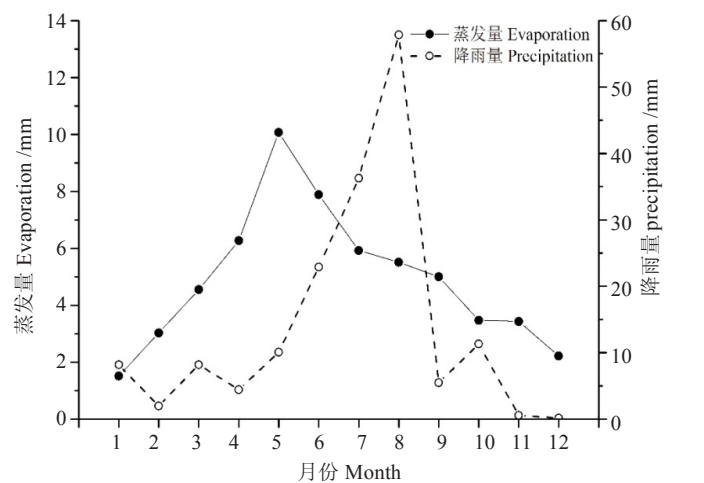


图2 2017年研究区月平均降雨量和蒸发量

Fig.2 Average monthly precipitation and evaporation of study area in 2017

电导率,mS/m。对于未测定含盐量的土样,可由浸提液电导率EC经上式换算得到。

1.4 数据处理

本文主要利用SPSS19.0软件进行数据的描述性统计分析、正态性检验及相关分析。半方差函数计算在GS+10.0软件中进行;ArcGIS10.2软件进行研究区矢量化及采样点绘制;2D数据插值在ArcGIS10.2软件的地统计分析模块完成;3D空间分布图的绘制采用SGeMS 2.0软件,考虑到垂向(Z)的变化范围较小,为获得最佳的可视化效果,绘制的3D空间分布图中垂直方向均扩大10倍。

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量和有机质的描述性统计分析

对研究区不同时期不同深度土壤含盐量和表层土壤有机质含量进行描述性统计分析和K-S正态性检验($P < 0.05$,双尾),结果见表1。可以看出,不同时期0~30 cm土壤有机质含量变幅较大,达到37.30 g/kg,随着棉花生长时期变化,土壤有机质含量逐渐降低,其变异系数在

0.23~0.56 之间变化,呈现递减的规律,属于中等变异强度。从土壤含盐量的变幅看,不同层位不同时期差异性较大,最大变幅达到 57.20 g/kg;从均值来看,苗期和花期土壤含盐量随土层加深而增加,呈现底聚趋势,花铃期和收获期土壤含盐量变化不大;同一土层不同时期内土壤含盐量随土层加深呈现递减趋势。按照王遵亲等土壤盐渍化分级标准(滨海地区),研究区盐渍化程度较高^[23],最

大均值为苗期底层土壤含盐量达到 13.08 g/kg,最小均值为 1.66 g/kg,说明土壤高含盐量是该区农业生产的主要限制因素。从不同土层的变异系数来看,随着土层加深变异系数逐渐增大,但整体处于中等变异强度;从同一土层的不同时期看,苗期和花期变异强度明显高于花铃期和收获期。K-S 检验表明各层土壤含盐量和有机质含量均服从正态分布。

表 1 不同时期不同层位土壤含盐量和有机质的统计特征值(n=24)
Table 1 Statistical feature values of soil salinity and organic matter in different layers and different periods(n=24)

项目 Items	时期 Period	极小值 Min/(g·kg ⁻¹)	极大值 Max/(g·kg ⁻¹)	均值 Average/(g·kg ⁻¹)	S.D	C.V	K-Sp
有机质 Organic matter (0~30 cm)	苗期(SS)	4.42	41.72	20.49	11.57	0.56	0.27
	花期(FS)	3.95	34.76	14.27	8.35	0.59	0.81
	花铃期(FBS)	2.54	10.10	4.68	1.49	0.32	0.13
	收获期(HT)	2.13	5.79	4.27	0.99	0.23	0.81
0~30 cm	苗期(SS)	2.48	9.83	5.18	1.94	0.37	0.91
	花期(FS)	2.10	8.80	4.24	1.80	0.42	0.90
	花铃期(FBS)	0.86	5.23	2.68	1.13	0.42	0.96
	收获期(HT)	0.84	3.10	2.07	0.69	0.33	0.88
含盐量 Salinity	苗期(SS)	2.62	17.20	6.57	3.55	0.54	0.53
	花期(FS)	1.40	10.38	4.74	2.59	0.55	0.84
	花铃期(FBS)	1.11	3.74	2.16	0.59	0.27	0.13
	收获期(HT)	0.82	2.61	1.66	0.52	0.31	0.96
30~60 cm	苗期(SS)	0.60	57.80	13.08	12.75	0.98	0.16
	花期(FS)	0.60	33.28	8.42	8.15	0.97	0.18
	花铃期(FBS)	0.54	3.95	2.01	0.80	0.40	0.83
	收获期(HT)	0.78	2.68	1.66	0.66	0.40	0.57
60~90 cm	苗期(SS)	0.60	57.80	13.08	12.75	0.98	0.16
	花期(FS)	0.60	33.28	8.42	8.15	0.97	0.18
	花铃期(FBS)	0.54	3.95	2.01	0.80	0.40	0.83
	收获期(HT)	0.78	2.68	1.66	0.66	0.40	0.57

注:SS 为苗期;FS 为花期;FBS 为花铃期;HT 为收获期;S.D 为标准差;C.V 为变异系数;K-Sp 为柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(双尾)。下同。
Note: SS = seeding stage, FS = flowering stage, FBS = flowering and boll setting stage, HT = harvesting time, S.D=standard deviation, C.V=coefficient of variation, K-Sp = significance (two-tailed) of one-sample Kolmogorov - Smirnov test.The same below .

2.2 土壤含盐量和有机质的相关分析

不同时期不同深度土壤含盐量与有机质含量的相关关系如表 2 所示。可以看出,随着土壤深度的增加,土壤有机质含量与土壤含盐量的相关性逐渐降低,表层土壤含盐量与有机质含量的相关性最高,相关系数在 0.25~0.38 之间变化,但没有达到显著相关的水平,说明土壤含

盐量只能在较小的程度上影响有机质含量,同时不同时期土壤有机质和土壤含盐量的相关系数变化不大。从不同时期不同层位的土壤含盐量相关性可以看出,不同层位的土壤含盐量之间相关性很大,呈显著或极显著的相关关系,最小值为 0.44,最大值达到 0.75,说明不同层位的土壤含盐量相互影响很大。

表 2 不同时期不同深度土壤含盐量和有机质的相关分析
Table 2 Correlation analysis of soil salinity and organic matter in different depth in different periods

	苗期 Seeding stage				花期 Flowering stage				花铃期 Flowering and boll setting stage			收获期 Harvesting time			
	OM	St _{30cm}	St _{60cm}	St _{90cm}	OM	St _{30cm}	St _{60cm}	St _{90cm}	OM	St _{30cm}	St _{60cm}	OM	St _{30cm}	St _{60cm}	St _{90cm}
OM	1.00				1.00				1.00			1.00			
St _{30cm}	0.33	1.00			0.25	1.00			0.38	1.00		0.35	1.00		
St _{60cm}	0.13	0.52**	1.00		0.18	0.50*	1.00		0.12	0.64**	1.00	0.16	0.57**	1.00	
St _{90cm}	0.10	0.44*	0.66**	1.00	0.14	0.47*	0.75**	1.00	0.09	0.45*	0.56**	0.08	0.48*	0.69**	1.00

注:OM 为有机质;St 为土壤含盐量。
Note: OM is Organic matter, St is Soil salinity.

2.3 土壤含盐量和有机质的空间变异性分析

表 3 为不同时期不同层位土壤含盐量与有机质的半方差拟合模型及其参数。可以看出,土壤有机质空间分布的拟合模型除收获期为指数模型外,其他时期均符合球状模型。土壤有机质的块金值表明存在试验误差和小于实际取样尺度引起的变异。用百分比表示的块基比值,可以看作是划分区域化变量空间依赖性的标准^[24,25]。不同时期土壤有机质的块基比变化范围在 42.28%~

57.64% 之间,具有中等强度的空间自相关性,这通常可以归因于自然因素(土壤质地等)和人为因素(灌溉、耕作方式等)共同作用的结果。决定系数 R²和残差平方和 RSS 可以用来评估预测模型是否是最优拟合模型^[26],从不同时期有机质的检验结果来看,决定系数 R²均接近于 1,残差平方和 RSS 均接近于 0,说明预测模型能很好的反映土壤有机质的空间分布特征。变程的变化范围为 55.28~86.18 m,大于采样间距的 50 m,表明取样间距合理。

从不同时期不同层位土壤含盐量空间分布的拟合模型看,均符合球状模型。30 cm和60 cm两个层位不同时期土壤含盐量的块基比均具有中等空间自相关程度,90 cm不同时期土壤含盐量均具有强的空间自相关性(块基比值<25%),随着深度的增加自相关程度逐渐升高,说明

随着土壤深度的增加人为影响逐渐减少,自然因素的影响逐渐增加。从土壤含盐量的变程来看,均大于取样间距40 m,取样间距合理。决定系数 R^2 的变化范围为0.58~0.83,残差平方和RSS均接近于0,说明球状模型能较好的模拟土壤盐分在不同时期不同层位的空间分布特征。

表3 不同时期不同层位土壤含盐量和有机质的半方差模型及其参数
Table 3 Semivariance models and parameters of soil salinity and organic matter in different layers in different periods

项目 Items	层位 Layer/cm	时期 Period	模型 Model	块金值 Nugget Co	基台值 Sill Co+C	块基比 Co/ (Co+C) /%	Ao/m	R ²	RSS
有机质 Organic matter	0~30	苗期(SS)	S	0.12	0.28	42.57	55.28	0.63	0.003
		花期(FS)	S	0.08	0.15	51.35	58.15	0.55	0.009
		花铃期(FBS)	S	0.24	0.42	57.64	64.37	0.71	0.005
		收获期(HT)	E	0.09	0.18	49.85	67.72	0.82	0.010
含盐量 Salinity	0~30	苗期(SS)	S	0.15	0.38	39.83	57.27	0.68	0.002
		花期(FS)	S	0.07	0.17	40.15	69.45	0.73	0.014
		花铃期(FBS)	S	0.33	0.75	44.20	64.16	0.66	0.026
		收获期(HT)	S	0.14	0.23	61.64	82.84	0.77	0.007
	30~60	苗期(SS)	S	0.05	0.13	39.65	63.73	0.83	0.023
		花期(FS)	S	0.23	0.85	27.13	79.25	0.79	0.009
		花铃期(FBS)	S	0.35	1.35	25.94	58.42	0.62	0.016
		收获期(HT)	S	0.16	0.49	32.59	86.18	0.69	0.022
	60~90	苗期(SS)	S	0.21	1.37	15.38	70.51	0.75	0.005
		花期(FS)	S	0.13	0.57	22.86	62.85	0.82	0.017
		花铃期(FBS)	S	0.18	0.86	21.05	78.86	0.58	0.013
		收获期(HT)	S	0.41	2.15	19.03	83.29	0.74	0.021

注:S为球状模型;E为指数模型;Ao为变程;RSS为残差。
Note:S=Spherical model; E = Exponential model; Ao = Range; RSS = Residual sum of squares.

2.4 土壤有机质含量的Kriging插值分析

图3为不同时期表层土壤有机质含量的空间分布图。从空间分布特征可以看出,土壤有机质含量均呈条带状分布,苗期和花期的土壤有机质含量空间分布特征具有相似性,有机质含量由西向东逐渐增加。花铃期土壤有机质含量以东北部含量最低,低值区占四分之一面积,其他区域含量较高;收获期有机质含量高值区集中在西北部和东南部。从有机质含量的时间变化来看,从苗期到收获期,有机质含量逐渐降低,同时有机质含量降低的幅度逐渐减少。

2.5 土壤含盐量的三维插值分析

研究区土壤含盐量三维分布如图4所示,其中各时期土壤含盐量分布图中左侧为土壤盐分的三维空间分布,右侧为土壤含盐量在X-Y方向上土壤深度60 cm处的切片图。从图4可以看出,土壤含盐量的空间分布在不同时期不同深度具有相似性,即表层土壤含盐量的斑块状分布特点在深层土壤仍然得到延续和体现,其空间格局总体接近;苗期和花期的土壤含盐量以东南部较高;花铃期和收获期土壤含盐量空间分布比较散乱,呈斑块状分布。从土壤盐分的时间变化来看,同一土壤深度土壤含盐量随时间变化逐渐降低,同一时期土壤含盐量随深度变化表现各异,苗期土壤含盐量随深度增加而增大,花期表现出与苗期一致的特点。花铃期和收获期土壤含盐量随深度增加基本保持稳定。

3 讨论

3.1 施肥与作物生长对土壤有机质含量的影响

土壤有机质是土壤中各种营养元素的主要来源之一,对土壤形成、土壤理化性质、养分循环、农业生态系统健康等具有重要作用^[27]。本文中,研究区土壤有机质含量最高值为苗期的20.49 g/kg,最低值为收获期的4.27 g/kg,参考表4全国土壤有机质分级标准,苗期土壤有机质含量为3级(中等)水平,花期属于4级(较缺)的水平,而花铃期和收获期土壤有机质含量则属于5级(缺)水平,有机质含量最低。研究区棉花种植前期使用了部分复合肥(525 kg/hm²)和有机肥(600 kg/hm²),这也可以解释棉花生长前期土壤中有机质含量相对较高。随着时间的推移,土壤有机质逐渐在棉花生长发育过程中被吸收,因此土壤有机质含量逐渐降低。总体来看,研究区土壤有机质含量较低,需要在棉花生长的关键时期及时增施有机肥料以满足棉花的生长需求,否则可能会影响棉花的产量。

表4 全国土壤有机质分级标准
Table 4 Standards of soil nutrient in China

等级 Classification	有机质含量 Organic content/(g·kg ⁻¹)
1级(丰富)Level 1 (rich)	>40.1
2级(较丰富)Level 2 (relative rich)	30.1~40.0
3级(中等)Level 3 (moderate)	20.1~30.0
4级(较缺)Level 4 (lack)	10.1~20.0
5级(缺)Level 5 (poor)	<10.0

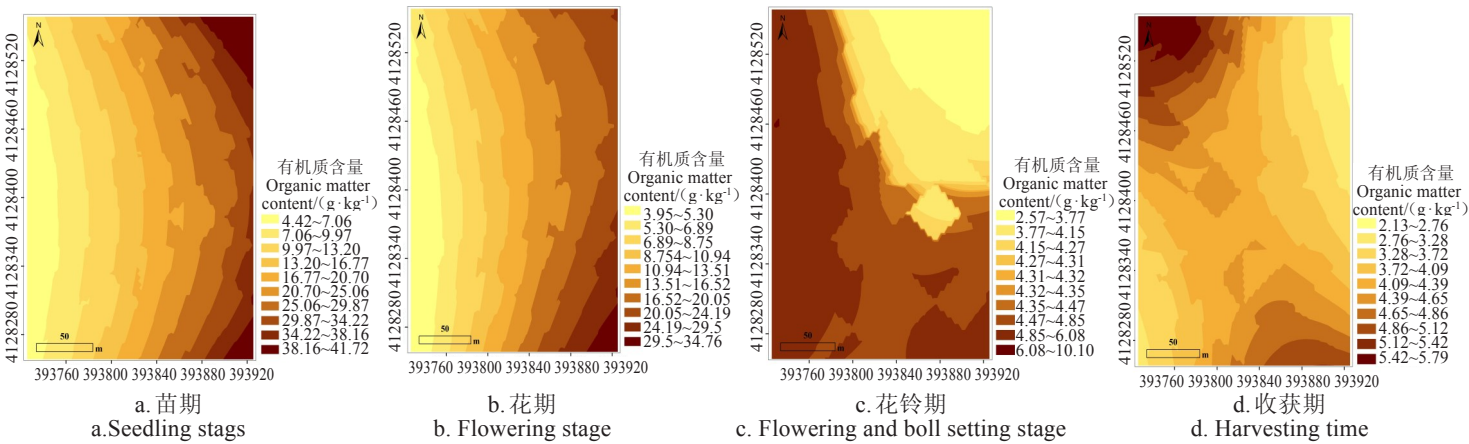
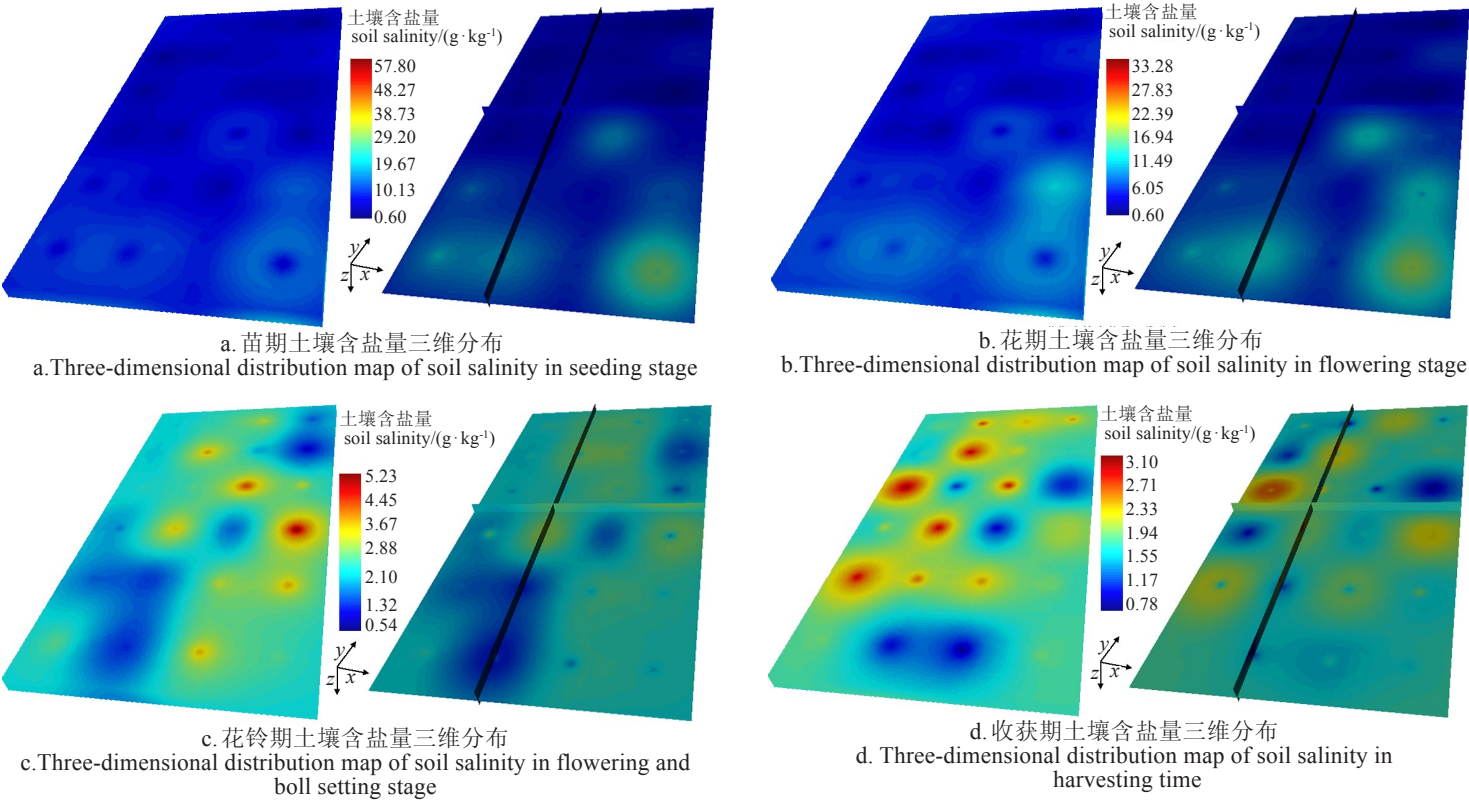


图3 不同时期表层土壤有机质含量分布图
Fig.3 Maps of surface soil organic matter content in different periods



注：各时期土壤含盐量分布图中左侧为土壤盐分的三维空间分布，右侧为土壤含盐量在X-Y方向上土壤深度60 cm处的切片图。
Note: The left side of the soil salt content distribution map for each period is the three-dimensional spatial distribution of soil salinity, and the right side is the section map of soil salinity content at the depth of 60cm in the X-Y direction.

图4 不同时期土壤含盐量三维空间分布图
Fig.4 Three-dimensional spatial distribution map of soil salinity in different periods

3.2 降雨蒸发对土壤含盐量和有机质含量的影响

降雨和蒸发等气象条件对土壤含盐量和有机质含量具有重要的影响作用。莱州湾雨季一般集中在6—8月份，因此苗期和花期的土壤盐分在雨水淋洗作用下向下运移趋势明显，表现出明显的底聚趋势。雨季过后的花铃期和收获期土壤表层盐分变化趋于稳定，少量的降雨不能对土壤盐分变化造成较大的影响。目前，研究区土壤正处于底层盐分高表层盐分相对较低的状态。研究表明，当土壤含盐量很高的底层土壤处于极限蒸发深度之内时，土壤中的盐分会在蒸发作用下沿毛管上升直接导致地表积盐^[28]。因此后期的田间管理需要在棉花生长关键时期增加灌溉次数和灌溉水量，保持对土壤盐分持续淋洗，降低土壤盐分出现返盐的趋势。从有机质的变化来看，整个棉花生育期土壤有机质呈下降趋势，与土壤含

盐量变化趋势类似，特别是花期和花铃期呈断崖式降低，但从土壤有机质含量变化来看，降雨量的变化对土壤有机质含量影响不明显，推测土壤有机质变化可能受气象和土壤质地等多种因素共同影响。

3.3 土壤质地对土壤含盐量和有机质含量的影响

土壤质地是反映土壤理化性质的综合指标，对土壤含盐量和有机质含量有重要影响作用^[29]。研究区土壤以砂质壤土为主，在东南角和西北角存在部分砂质粘壤土。从棉花的整个生育期来看，土壤盐分在不同时期表现为东南和西北角含盐量略高其他位置(图4)，这与土壤质地关系密切。从有机质含量变化来看(图3)，苗期和花期有机质含量变化具有相似趋势，与土壤质地关系密切程度较高的为东南角，而东北角与土壤质地的关系不明显。在花铃期和收获期土壤有机质含量变化与土壤质地

关系较为密切,表现在东北角和东南角有机质含量明显高于其他位置,砂质黏壤土中含有部分黏粒,当和有机物结合生成复合物后,降低了土壤有机质的移动性。总体来说,土壤质地对土壤含盐量变化的影响程度要高于对土壤有机质含量变化的影响。

3.4 土壤盐分对有机质含量的影响

不同深度土壤含盐量之间的相关性分析结果表明各层土壤含盐量存在显著或极显著的正相关关系,这与姚荣江等的研究结果一致^[30]。有研究表明,土壤含盐量与土壤有机质含量之间呈负相关关系^[21,31],但从本文的研究结果来看土壤含盐量只能在一定程度上影响土壤有机质含量的变化,而且随着土层深度的增加,影响越来越小。从棉花的整个生长期来看,土壤含盐量降低的同时表层土壤有机质含量也在降低,变化趋势类似。

4 结 论

1)研究区不同时期不同深度的土壤含盐量和有机质含量变幅较大,其中土壤含盐量最大变幅为苗期达到57.20 g/kg,有机质含量最大变幅为苗期达到37.3 g/kg;土壤含盐量和有机质含量的变异系数均在10%~100%之间,属于中等变异强度。各层土壤含盐量较高,且随土层深度的增加逐渐升高;随着时间的变化,土壤含盐量和有机质含量均呈现下降的趋势。不同时期不同深度土壤含盐量与有机质含量二者的相关性不明显,但不同层位之间的土壤含盐量相关性达到显著或极显著程度。

2)研究区表层土壤有机质含量空间分布除收获期为指数模型外,其他时期均符合球状模型,土壤含盐量的空间分布均符合球状模型。土壤含盐量与表层土壤有机质含量均具有中等强度的空间自相关性,变程均大于取样间距的40m,说明取样间距合理。 R^2 和残差的数值表明模型能较好的反映土壤盐分和有机质在不同时期不同层位的空间分布特征。

3)表层土壤有机质含量呈条带状分布,苗期和花期的土壤有机质含量由西向东逐渐增加,花铃期土壤有机质含量以东北部含量最低,收获期有机质含量高值区主要集中在西北部和东南部。土壤含盐量的空间分布在不同时期不同深度具有相似性,其空间分布特征总体较为接近;苗期和花期土壤含盐量高值区出现在东南部方向,其他区域较低;花铃期和收获期土壤含盐量空间分布比较散乱,呈斑块状分布。

总体来说,目前莱州湾南岸盐田复垦区存在两个明显的特点,土壤含盐量高,土壤有机质含量低。因此,在后期的田间管理中需要进行更为精细的土地平整工作,进而使水分下渗均匀,提高降雨淋盐和灌溉洗盐的效果;进行深耕深翻,疏松作物根系的耕作层,切断土壤毛管作用,减少土壤水分往上蒸发,控制土壤返盐;在资金允许的情况下,铺设暗管,使土壤盐分随地下水流入暗管后从排水沟集中排走,降低暗管之上土壤中的含盐量;增施有机肥,培肥土壤、改善土壤结构、增强土壤保水保肥能力的同时也能够减少水分蒸发,促进土壤盐分淋盐,抑制返盐。

[参 考 文 献]

- [1] Marshall G R, Jones R E. Significance of supply response for estimating agricultural costs of soil salinity[J]. *Agricultural Systems*, 1997, 53(2): 231—252.
- [2] Pascale S D, Maggio A, Barbieri G. Soil salinization affects growth, yield and mineral composition of cauliflower and broccoli [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23(3): 254—264.
- [3] Seleiman M F, Kheir A M S. Saline soil properties, quality and productivity of wheat grown with bagasse ash and thiourea in different climatic zones[J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 538—546.
- [4] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 276—284.
- [5] Bot A J, Nachtergaele F O, Young A. Land Resource Potential and Constraints at Regional and Country Levels[R]. *World Soil Resources Reports*, Food and Agriculture Organization (FAO): Rome, Italy, 2000: 1—114.
- [6] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1311—1319. Liu Wenquan, Lu Fang, Xu Xingyong, et al. Spatial variation of soil salinity and organic matter under reclamation in an abandoned salt pan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1311—1319. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yao R J, Yang J S, Zhang T J, et al. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland[J]. *Geoderma*, 2014, 232—234: 381—393.
- [8] 王全九, 毕磊, 张继红. 新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 138—145. Wang Quanjiu, Bi Lei, Zhang Jihong. Spatial variability analysis of large-scale soil water, salt and heat characteristics in Baotou lake irrigation area of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(18): 138—145. (in Chinese with English abstract)
- [9] Niñerola V B, Navarro-Pedreño Jose, Lucas I G, et al. Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 174: 53—58.
- [10] 徐存东, 王荣荣, 程慧, 等. 基于遥感数据分析干旱区人工绿洲灌区的水盐时空分异特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 80—89. Xu Cundong, Wang Rongrong, Cheng Hui, et al. Spatial-temporal distribution of water and salt in artificial oasis irrigation area in arid area based on remote sensing analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(2): 80—89. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li H Y, Shi Z, Webster R, et al. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil[J]. *Geoderma*, 2013, 195—196: 31—41.
- [12] 云安萍, 鞠正山, 胡克林, 等. 基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 148—156, 172. Yun Anping, Ju Zhengshan, Hu Kelin, et al. Three-dimensional spatial interpolation of soil salinity based on inverse distance

- weighting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 148—156, 172. (in Chinese with English abstract)
- [13] Liu G M, Li J B, Zhang X C, et al. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for eco-restoring the Yellow River Delta in combination with electromagnetic induction[J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 306—314.
- [14] 吴亚坤, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于电磁感应研究新疆土壤盐分三维空间变异对季节的响应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 173—178.
- Wu Yakun, Liu Guangming, Su Litan, et al. Response of three-dimensional spatial variability of soil salinity to change of season of Xinjiang based on electromagnetic induction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 173—178. (in Chinese with English abstract)
- [15] Li H Y, Marchant B P, Webster R. Modelling the electrical conductivity of soil in the Yangtze delta in three dimensions[J]. Geoderma, 2016, 269: 119—125.
- [16] 岳耀杰, 张峰, 张国明, 等. 滨海盐碱地利用变化与优化研究——以黄骅市“台田-浅池”模式为例[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 423—430.
- Yue Yaojie, Zhang Feng, Zhang Guoming, et al. Coastal saline-alkali land use change and its optimization: A case study on the ‘raised Field -Shallow Pond’ Pattern in Huanghua County[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 423—430. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陆正松. 盐田改棉地土壤改良增产技术[J]. 土壤肥料, 1997(04): 15—16.
- Lu Zhengsong. Technology of soil improvement and yield increase in cotton field instead of salt pan[J]. Journal of Soil Fertilizer, 1997(04): 15—16. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡仲煜. 盐田改棉田的治理改良措施初探[J]. 浙江农业科学, 1997(05): 33—34.
- Hu Zhongyu. Preliminary study on the improvement measures of salt pan to cotton field[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1997(05): 33—34. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘文全, 卢芳, 于洪军, 等. 莱州湾南岸重盐渍化区不同土壤盐分离子的分布特征[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(04): 586—596.
- Liu Wenquan, Lu Fang, Yu Hongjun, et al. Distribution characteristics of different soil salt ions in severe salinization regions in the southern coastal area of Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(04): 586—596. (in Chinese with English abstract)
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106—109.
- [21] 杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏. 禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2196—2202.
- Yang Qiyong, Yang Jingsong, Yu Shipeng. Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2196—2202. (in Chinese with English abstract)
- [22] Michot D, Walter C, Adam I, et al. Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley[J]. Geoderma, 2013, 207-208: 193—204.
- [23] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [24] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils[J]. Soil Science, 1997, 162: 291—297.
- [25] Shi Z, Li Y, Wang R C, et al. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field[J]. Environmental Geology, 2015, 48: 171—178.
- [26] Yao R J, Yang J S, Zhang T J, et al. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland[J]. Geoderma, 2014, 232-234: 381—393.
- [27] Ondrasek G, Bakić B, Helena Z, et al. Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications[J]. Science of The Total Environment, 2019, 658: 1559—1573.
- [28] 冷祥阳, 许士国, 许翼. 盐田填土造陆区盐渍化的调查与分析[J]. 东北水利水电, 2015(9): 19—21.
- Long Xiangyang, Xu Shiguo, Xu Yi. Investigation and analysis of salinization in land - filling area of saline field[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2015(9): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张伟, 李鲁华, 刘建国, 等. 准葛尔盆地南缘不同土壤质地棉田膜下滴灌盐分运移规律研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 52—56.
- Zhang Wei, Li Luhua, Liu Jiangguo, et al. Salt transfer for plastic sheet covered cotton field using drip irrigation at different soil texture in the north edge of Dzungarian Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [30] 姚荣江, 杨劲松, 赵秀芳, 等. 沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 91—97.
- Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 91—97. (in Chinese with English abstract)
- [31] 谢承陶, 李志杰, 章友生, 等. 有机质与土壤盐分的相关作用及其原理[J]. 土壤肥料, 1993(1): 19—22.
- Xie Chengtao, Li Zhijie, Zhang Yousheng, et al. Mechanism and correlation of organic matter with soil salinity[J]. Soil fertilizer, 1993(1): 19—22. (in Chinese with English abstract)

Spatial variability of soil salinity and organic matter in reclaimed area of abandoned salt pan in coast

Liu Wenquan^{1,2}, Lu Fang^{2,3}, Xu Xingyong^{1,2*}, Fu Yunxia⁴, Fu Tengfei^{1,2}, Chen Guangquan^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;*

3. *Shandong Provincial key Laboratory of Marine Environment, College of Environmental Science and Engineering Ocean University of China; Qingdao 266100 China;*

4. *Qingdao Geological Engineering Investigation Institute, Qingdao 266017, China)*

Abstract: The southern area of Laizhou bay is located by the Bohai sea. There have been three seawater intrusion events in history, and a mass of high concentration saline brine has been buried in its subsurface aquifers. Large - scale exploitation of underground brine resources has been carried out since the 1970s. Brine baysalt has become a pillar industry of local economic development. In recent years, many salt pans become abandoned due to the exhaustion of regional shallow brine resources and the restriction of high cost and market factors of deep brine exploitation. In this context, some salt pans have been reclaimed based on the relevant government policies. Although a series of remediation measures that combining agriculture and engineering have been carried out on the reclaimed land of salt pans, the soil still contains a large amount of soluble salt on account of the influence of perennial baysalt process, moreover, the content of soil nutrients is also extremely low. The high soil salinity has always been the main limiting factor for the sustainable development of agriculture in the reclamation areas of abandoned salt fields. In this paper, soil sampling data of cotton growth period in four key nodes were used to study the spatial distribution characteristics of soil organic matter and soil salinity at different depths in different periods, and to analyze the correlation between them. The two-dimensional spatial distribution map of soil organic matter content and the three-dimensional spatial distribution map of soil salinity in different periods were drawn. The results showed that the variation of soil salinity and organic matter content at different depths in different periods in the study area was large, among which the maximum variation of organic matter content reached 37.3 g/kg and the maximum variation of soil salinity reached 57.2 g/kg, the variation intensity of both soil salinity and organic matter content was moderate. Soil salinity and organic matter content decreased with time change. The correlation between soil salinity and organic matter content in the soil layer of 0 - 30 cm was the highest, the range was from 0.25 to 0.38, but it did not reach the level of significant correlation. The correlation of soil salinity between different layers reached a significant or extremely significant degree. There was a moderate spatial autocorrelation between soil salinity and surface soil organic matter content. Kriging interpolation results showed that the surface soil organic matter content was distributed in a banded manner, the organic matter content increased gradually from west to east in seedling stage and flowering stage. The soil organic matter content in the flowering and boll period was the lowest in the northeast, and the highest in the harvest period was concentrated in the northwest and southeast. The three-dimensional spatial distribution of soil salinity was similar in different periods and different layers, and its spatial distribution characteristics were generally close. The high soil salinity area at seedling and flowering stage appeared in the southeast. The spatial distribution of soil salinity in flowering and flowering period was scattered and patchy. The results provide technical support for scientific improvement and rational utilization of saline soil and sustainable development of agriculture to the southern area of Laizhou Bay.

Keywords: soils; salt; reclamation; abandoned salt pan; soil organic matter; three-dimensional