

莱州湾南岸土壤盐渍化与养分特征^①

姜冰^{1,2}, 马健^{1,2}, 张德明^{1*}, 李明波¹, 刘阳¹, 范海滨¹

(1 山东省第四地质矿产勘查院, 山东潍坊 261021; 2 山东省地质矿产勘查开发局海岸带地质环境保护重点实验室, 山东潍坊 261021)

摘要: 为研究土壤盐渍化水平对土壤养分指标的影响, 以莱州湾南岸为研究区域, 通过系统采样测试, 获得了 212 件表层土壤样品的全盐量、pH、全氮、全磷、全钾、有机质等各项指标数据, 结合地统计学和地理信息系统技术, 采用相关分析、单因素方差分析等方法, 探讨了土壤盐渍化对养分特征的影响。结果表明, 研究区土壤全盐量均值为 0.84%, 空间变异性强, 总体呈现北高南低的分布特征。土壤 pH 均值为 8.28, 主要为碱性土壤。土壤全氮、有机质均值分别为 0.52、9.8 g/kg, 处于缺乏等级; 全磷、全钾均值分别为 0.64、17.1 g/kg, 处于中等等级。土壤养分综合等级以四等为主, 样本数占比 64.15%。土壤养分各指标含量互呈显著正相关, 表现出较强的空间相关性。土壤养分指标与全盐量均呈显著负相关, 除全钾外均与土壤 pH 呈显著负相关。滨海盐土的养分指标最低。本研究结果可为地区性的土壤改良和开发利用提供科学依据。

关键词: 莱州湾南岸; 土壤盐渍化; 土壤养分; 地统计学; 空间分布

中图分类号: P595; S151.9 **文献标志码:** A

Soil Salinization and Nutrient Characteristics in the Southern Coast of Laizhou Bay

JIANG Bing^{1,2}, MA Jian^{1,2}, ZHANG Deming^{1*}, LI Mingbo¹, LIU Yang¹, FAN Haibin¹

(1 Shandong Provincial No.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang, Shandong 261021, China; 2 Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection, Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Weifang, Shandong 261021, China)

Abstract: In order to ascertain the influence of soil salinization level on the nutrient indexes, the southern coast of Laizhou Bay was taken as the research area. Through systematic sampling and testing, soil data of various indicators such as total salt content, pH, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and organic matter were obtained from 212 topsoil samples, and the influences of soil salinization on nutrient characteristics were explored using methods such as correlation analysis and one-way ANOVA, combined with geostatistics and geographic information system technology. The results showed that the average value of soil total salt content was 0.84%, with strong spatial variability, and the overall distribution characteristics were high in north and low in south. The average value of soil pH was 8.28, mainly alkaline soil. The average values of total nitrogen and organic matter were 0.52 g/kg and 9.8 g/kg, respectively, indicating a deficiency level. The average values of total phosphorus and total potassium were 0.64 g/kg and 17.1 g/kg, respectively, indicating a moderate level. The comprehensive grade of soil nutrients was mainly in the fourth, with a sample size of 64.15%. There was a significant positive correlation between the contents of various soil nutrient indexes, showing a strong spatial correlation. All soil nutrient indexes were significantly negatively correlated with total salt content, and significantly negatively correlated with soil pH except for total potassium. Soil nutrient indexes were the lowest in coastal saline soil. The results of this study can guide regional soil improvement and development.

Key words: Southern coast of Laizhou Bay; Soil salinization; Soil nutrients; Geostatistics; Space distribution

土壤盐渍化影响作物生长, 是农业生产的主要障碍因素, 阻碍区域经济发展^[1]。土壤盐渍化程度越高, 养分含量越低, 二者一般表现为负相关关系^[2]。土壤

盐渍化与养分特征均是重要的土壤属性, 直接影响着土壤生产力, 土壤属性的空间分布特征是土地管理、农业生产和生态环境管控的重要依据, 是自然条件、

①基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局地质勘查引领示范与科技攻关项目(KC202207、KY202206)资助。

* 通信作者(ddszdm@163.com)

作者简介: 姜冰(1984—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事生态地球化学调查与研究。E-mail: jbing08@163.com

成土过程及土地利用等因素综合结果的反映^[3]。结合地统计学和地理信息系统(GIS)技术研究土壤属性空间变异特征,既能体现土壤的区域性特征和发生规律,又能总结出土壤与农业生产之间的内在联系^[4]。陈广泉等^[5]运用地统计学与 GIS 技术相结合,研究发现莱州湾南岸不同土层土壤含盐量具有显著空间变异性。刘宏伟等^[6]采用统计学和 GIS 技术研究了淮北平原土壤盐渍化指标的空间分布特征,分析认为土壤固有盐分主要受沉积相背景控制,盐分积聚主要是地下水咸化导致的。刘文全等^[7]通过地统计分析和相关分析,研究发现莱州湾南岸土壤全盐量与有机质具显著负相关关系。于得芹和蒙永辉^[8]以地统计学为基础,研究发现莱州湾南岸土壤盐分离子高值区与海咸水入侵范围高度吻合。

莱州湾南岸受海水入侵影响,土壤盐渍化问题严重。该区更新世以来发生过 3 次较大规模海侵事件,受其形成的海相地层影响,地下水富含盐分^[9],导致土壤盐分本底高,目前仍受海潮直接或间接影响。河流自南向北携带大量泥沙入莱州湾,不断在近海沉积,当处在水下堆积阶段就被高矿化度的海水所浸渍,成为盐渍淤泥;当海水退却,出水成陆后即滩涂。蒸发浓缩作用下,地下水矿化度升高,同时盐分向地表积累。海水随海潮入侵和逆河倒灌,向滨海及河流近岸地下水连续补给盐分,参与土壤积盐过程,而随着地下水不合理超采形成降落漏斗^[10],更是加剧了这一过程。该区拥有丰富的土壤资源,但由于受干旱、海潮和盐碱等自然灾害的影响,土壤颗粒结构被破坏,土壤的通透性和保肥保水能力下降,对作物生长极为不利。近海岸区长期处于盐胁迫条件下,地面植被稀疏甚至光秃,土壤农业生产力总体处于较低水平,土壤盐渍化还严重制约该区区域规划和生态环境安全。因此,摸清该地区土壤盐渍化和养分等土壤属性,对于农业生产和生态环境具有重要的地区性科学和应用价值。本文通过系统采样分析测试,获取莱州湾南岸土壤盐渍化和养分指标数据,将地统计学与 GIS 技术相结合,绘制指标含量空间分布图,辅以相关分析和单因素方差分析,评估土壤盐渍化程度和养分水平,探讨土壤盐渍化与养分特征之间发生分布的联系,以期莱州湾南岸土壤盐渍化的改良和耕地后备资源的重新利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东半岛北部,渤海莱州湾南岸滨海

地带,西起小清河,东至胶莱河。地形为滨海低平地、沿海洼地及滩涂地,海拔多在 6 m 以下,成土母质为海相沉积物和河流冲积物迭次相间,形成的土层厚达数百米,土壤资源丰富,地下潜水层埋藏有高矿化度卤水。该区属暖温带季风型半干旱大陆性气候,光照充足,雨量集中,湿热同季,四季分明,年均蒸发量 1 942.3 mm,远高于年均降水量 606.5 mm。土壤类型自北向南依次分布滨海盐土、盐化潮土和潮土亚类等。近海区域受海陆相交互沉积作用和海水浸渍影响,土壤富含可溶性盐分,是盐渍土的集中地带。土壤水盐年度变化受气候影响,旱季蒸发、积盐,雨季淋溶、脱盐,农谚有云“七月八月地如筛,九月十月又上来,三月四月最厉害”,积盐大于脱盐,即形成土壤盐渍化,同时土壤养分匮乏,土壤生产力处于较低水平。

1.2 样品采集

于 2020 年 11 月开展现场调查和采样,此时作物已收获,处于枯水期,降水引起的土壤水盐运动已结束,水、土化学性质较为稳定,地下水消退主要靠天然蒸发,且蒸发量相对较小,水盐均衡^[5]。土壤样品采集以随机、均匀为原则,结合土地利用现状和土壤类型,充分考虑其典型代表性,采用 GPS 定位,定位点向四周辐射 30~50 m,确定 3~5 个分样点,用竹铲对 0~20 cm 土层均匀采样,将样品掰碎并挑出杂物,各分样点等量组成一个混合样,充分混匀后,四分法取 500 g 装入干净棉布袋。共采集土壤样品 212 件,采样点位见图 1。

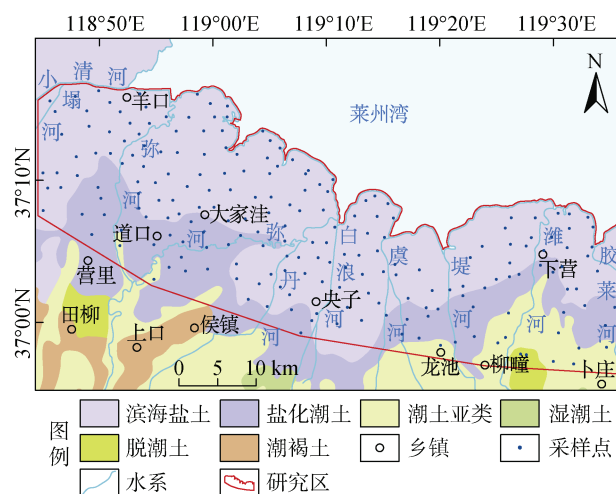


图 1 研究区土壤类型及采样点位

Fig. 1 Soil types and sampling sites in the study area

1.3 测定方法

样品测试由山东省地质矿产勘查开发局海岸带

地质环境保护重点实验室完成。样品置于室内通风且无阳光直射处自然风干，经木棍碾压全部过 2 mm 尼龙孔径筛，用四分法分为 3 份，一份供测土壤 pH 和全盐量，一份经碾磨全部过 0.25 mm 尼龙孔径筛供测有机质和全氮，一份经玛瑙研钵磨细全部过 0.074 mm 尼龙孔径筛供测全磷和全钾。

经水浸提(水土比 2.5 : 1, $V:m$)，采用 FE28 型 pH 计测定土壤 pH。经水浸提(水土比 5 : 1, $V:m$)，采用 DDSJ-308A 型电导仪测定全盐量。经油浴加热，采用重铬酸钾氧化法测定有机质。经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮，采用 KDY-9820 型凯氏定氮仪测定全氮。经粉末压饼法处理，采用 Axios 型 X 荧光光谱仪测定全磷和全钾。各指标检出率均为 100%。使用国家标准物质(GBW 系列)检验分析方法的准确度和精密度，每个标准物质测定 12 次，所得平均值与标准值的对数偏差 $\Delta \lg C$ 均小于 0.05，相对标准偏差 RSD 均小于 0.08。样品进行 100% 重复分析，pH 绝对偏差小于 0.1，其他指标相对偏差 RE 均小于 30%。分析数据质量可靠。

1.4 评价方法

1.4.1 土壤盐渍化分级评价 土壤盐渍化是制约农业生产的重要非生物胁迫因素^[11]。在盐土环境中，盐分的空间不均匀分布对植物维持生长发挥着重要

作用，在均匀的高盐含量盐土中，植物将面临死亡^[12]。参照 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[13]中土壤盐渍化分级指标，结合对作物生长情况的影响，将莱州湾南岸表层土壤盐渍化划分为 4 个等级(表 1)。

表 1 表土层盐渍化分级标准		
Table 1 Classification standard for salinization of topsoil		
盐渍化等级	作物生长情况	全盐量(%)
轻度	稍有抑制	<0.2
中度	中等抑制	0.2 ~ 0.4
强度	严重抑制	0.4 ~ 0.8
盐土	死亡	>0.8

1.4.2 土壤养分综合评价 参照 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[13]，在土壤全氮、全磷、全钾单指标评价基础上，根据全氮、全磷、全钾的权重系数，计算土壤养分综合得分。公式为：

$$f_{\text{综}} = \sum_{i=1}^n k_i f_i \tag{1}$$

式中： $f_{\text{综}}$ 为土壤养分综合得分； k_i 为全氮、全磷、全钾的权重系数，分别为 0.4、0.4、0.2； f_i 为全氮、全磷、全钾单指标评价得分，五等、四等、三等、二等、一等分别得分为 1、2、3、4、5。土壤养分单指标等级和综合等级划分含义如表 2 所示。

表 2 土壤养分等级划分
Table 2 Classification of soil nutrients

等级	含义	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	有机质(g/kg)	$f_{\text{综}}$
一等	丰富	>2	>1	>25	>40	≥ 4.5
二等	较丰富	1.5 ~ 2	0.8 ~ 1	20 ~ 25	30 ~ 40	4.5 ~ 3.5
三等	中等	1 ~ 1.5	0.6 ~ 0.8	15 ~ 20	20 ~ 30	3.5 ~ 2.5
四等	较缺乏	0.75 ~ 1	0.4 ~ 0.6	10 ~ 15	10 ~ 20	2.5 ~ 1.5
五等	缺乏	≤ 0.75	≤ 0.4	≤ 10	≤ 10	<1.5

1.5 数据处理

采用 SPSS Statistics 22.0 进行描述性统计、单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Pearson 相关分析。地统计分析采用 ArcGIS 10.6 地统计分析模块，采用克里格法(Kriging)对指标含量进行空间插值处理，并绘制等值线图。土壤盐渍化等级和养分综合等级以分级标准进行等值线绘制；土壤全盐量和养分指标空间分布参照 DZ/T 0011—2015《地球化学普查规范》^[14]，采用累积频率的分级方法，以 1.5%、15%、25%、75%、95%、98.5% 分级间隔对应的含量进行等值线绘制。

2 结果与讨论

2.1 土壤盐渍化特征

研究区表层土壤盐渍化、养分及理化指标统计参数如表 3 所示。研究区表层土壤全盐量平均值为 0.84%，表明土壤盐渍化问题严重，变异系数达 1.44，分布不均匀，空间变异性强。土壤盐渍化程度总体呈现北高南低，高值区主要呈斑块状分布在近海岸区(图 2)。参照盐渍化分级标准绘制空间分布图(图 3)，达到盐土的样本为 65 个，占 30.66%，离海岸较远区域也有分布，作物生长在均匀的高盐分土壤中将面临

死亡；达强度、中度、轻度的样本分别为 26、20 和 101 个。该区地势低平、排水不畅，土壤盐渍化空间分布特征与地理位置、地形地貌及水文地质条件密切相关^[6]，目前自然条件下土壤积盐过程的盐分补给有海水浸渍、逆河倒灌和海水渗漏补给地下水 3 种形式。潮汐作用下，海水直接侵入沿海低地；干旱季节河水流量减少或遇风暴潮时，海水逆向进入河道；地下水位的周期性变化或地下水超采形成降落漏斗，使地下水位线失去平衡^[15]，海水向内陆渗透或逆河倒灌后经漏斗侧渗，补给地下水。另外，莱州湾南岸发育三期海相地层，赋存浅层天然卤水(高盐分地下水)^[9]，受水盐运移影响，土壤盐分本底高，加之大面积晒盐造成的卤水渗漏，致使土壤表层盐分升高。

表 3 土壤指标描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of soil indexes

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
全盐量(%)	0.02	6.98	0.84	1.21	1.44
pH	5.42	9.71	8.28	0.60	0.07
全氮(g/kg)	0.09	3.58	0.52	0.45	0.88
全磷(g/kg)	0.09	2.84	0.64	0.32	0.51
全钾(g/kg)	2.0	24.9	17.1	3.9	0.23
有机质(g/kg)	1.3	86.0	9.8	10.5	1.08

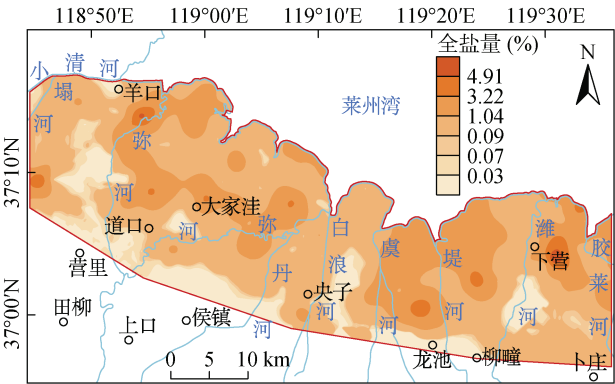


图 2 土壤全盐量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of soil total salt content

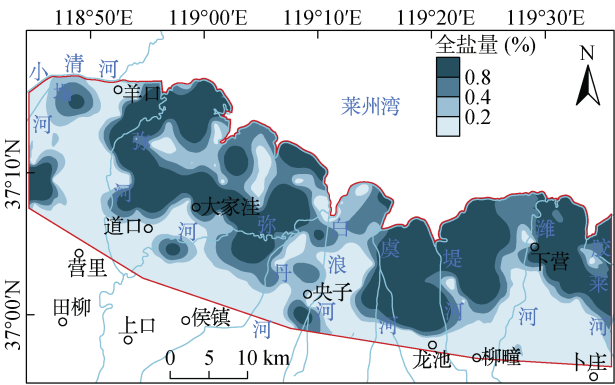


图 3 土壤盐渍化等级空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of soil salinization grade

2.2 土壤酸碱度特征

研究区表层土壤 pH 变化范围 5.42~9.71，平均值为 8.28，其中 pH>7.5 的样本为 194 个，占 90% 以上，反映研究区土壤主要呈碱性。Na⁺、Cl⁻ 为莱州湾南岸土壤盐分的主导离子^[8]，水解的 Na⁺ 将土壤胶体中的 Ca²⁺、Mg²⁺ 置换出来，导致土壤的碱化特征更为明显。当土壤溶液中的 Na⁺ 取得优势时，碱化作用加速，土壤性质恶化，碱化土壤中 Na⁺ 浓度升高会导致土壤 pH 升高，呈碱性反应。从空间分布来看(图 4)，研究区土壤 pH 整体较高，甚至部分地区大于 8.5，达强碱性。土壤偏碱性会不同程度地降低土壤养分的有效性，难以形成良好的土壤结构，抑制土壤微生物活动，影响作物生长发育^[16]。低值区主要分布在下营-龙池-卜庄一带，据现场调查，该区域农业发展水平较高，尤其是潍河沿岸引水灌溉设施完善，对土壤起到了较好的脱盐、脱碱作用，同时也表明科学的农业生产管理措施能够有效控制土壤中的盐分和碱度，从而改善土壤质量。

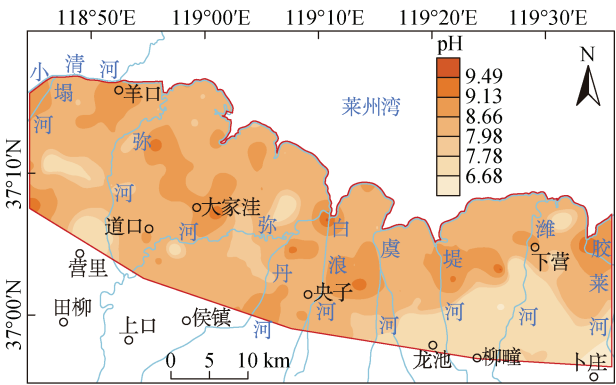


图 4 土壤 pH 空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of soil pH

2.3 土壤养分特征

2.3.1 土壤养分单指标特征 土壤氮素水平是影响作物生长发育的首要因素，在一定程度上反映了土壤健康和肥力状况^[17]。研究区表层土壤全氮含量范围为 0.09~3.58 g/kg，平均值为 0.52 g/kg，处于缺乏等级。变异系数为 0.88，空间分布较不均匀，属中等变异。研究区土壤整体氮素水平低，盐渍化土壤不仅抑制作物生长，同时加剧了氮素的损失，其硝化和反硝化过程是造成氮素损耗的主要因素^[18]。从空间分布来看(图 5)，总体呈北低南高的分布趋势，土壤全氮含量随着离海岸距离的增加而增加，下营-龙池-卜庄一带分布有高值区，与农业生产措施的影响有关。

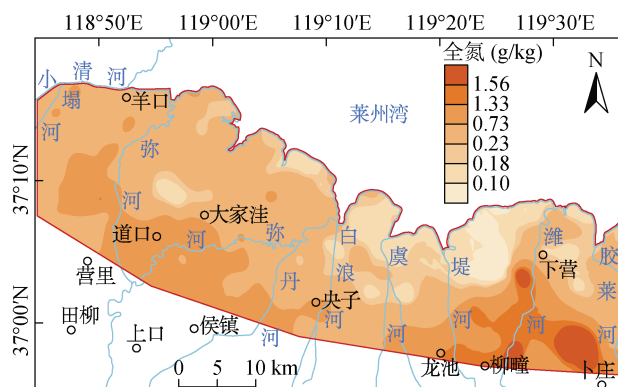


图 5 土壤全氮空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil total nitrogen

磷是作物生长及发育不可或缺的大量元素之一, 土壤全磷指的是土壤中各种形态磷的总贮量, 其含量主要由成土母质、风化及成土条件决定, 并受土壤类型和土地利用方式等因素影响^[19]。研究区表层土壤全磷含量范围为 0.09 ~ 2.84 g/kg, 平均值为 0.64 g/kg, 处于中等等级。变异系数为 0.51, 属中等变异。从空间分布来看(图 6), 总体呈现北低南高, 但低值区并不是均匀分布在海岸一带, 可能与海洋生物遗骸有关, 其富含的磷素, 在一定程度上可以通过风化和分解释放到土壤中。高值区主要为盐化潮土、潮土亚类分布区, 与全氮分布范围具较高的耦合性。已有研究表明, 滨海盐渍化土壤抑制磷的形态转化, 施入土壤的磷主要以难溶性磷酸盐形态存在, 农业生产过程中可以添加低量生物质炭或施用有机肥进行调控^[20]。

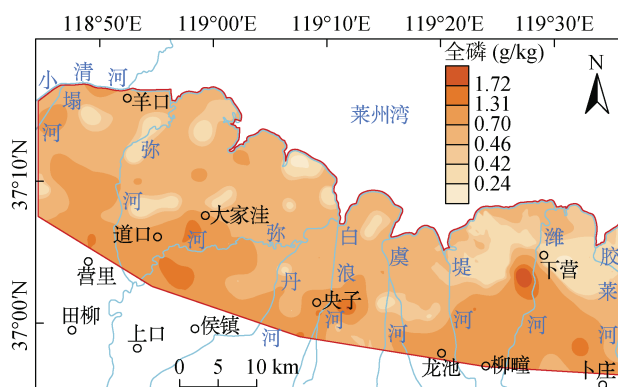


图 6 土壤全磷空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil total phosphorus

土壤全钾受成土母质影响显著^[21], 主要以矿物态钾赋存于土壤粗粒部分, 占全钾的 90% 以上, 不易被作物吸收利用。而海水对钾的有效性有一定正面影响, 滨海盐土的速效钾含量显著高于其他土壤类 g/kg, 平均值为 17.1 g/kg, 处于中等等级。变异系数为 0.23, 属中等变异, 空间变化相对于全氮、

全磷较为稳定。从空间分布来看(图 7), 低值区主要分布在研究区西北部, 河流冲积物母质的物源主要为小清河、弥河上游发育的碳酸盐岩类, 而碳酸盐岩钾含量远低于其他岩石, 其释放的钾同样较低^[23]。高值区分布与全氮、全磷高值区较为吻合。

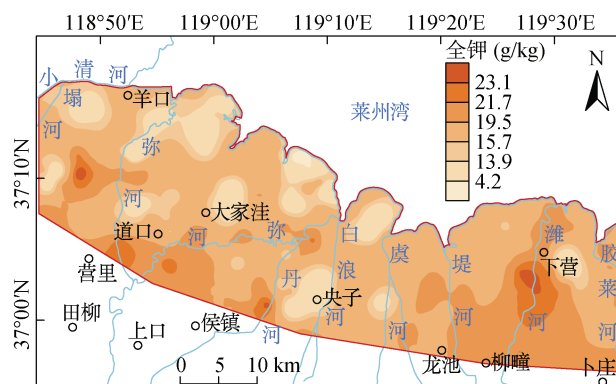


图 7 土壤全钾空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of soil total potassium

有机质是土壤重要组成部分, 是土壤养分的主要来源, 可以促进土壤结构形成、改善土壤性状、提高土壤保肥能力和缓冲性能等。研究区表层土壤有机质含量范围为 1.3 ~ 86.0 g/kg, 平均值为 9.8 g/kg, 处于缺乏等级, 受盐分危害, 土壤有机质难以积累, 总体含量水平低。变异系数为 1.08, 与全盐量同属高等变异, 滨海盐渍化土壤盐分含量因海陆相交互沉积作用分布不均, 直接影响有机质的变异特征^[24]。空间分布主要呈条带状, 局部斑块状(图 8), 总体表现为离海越近的土壤有机质含量越低, 与前人研究结果一致^[25]。

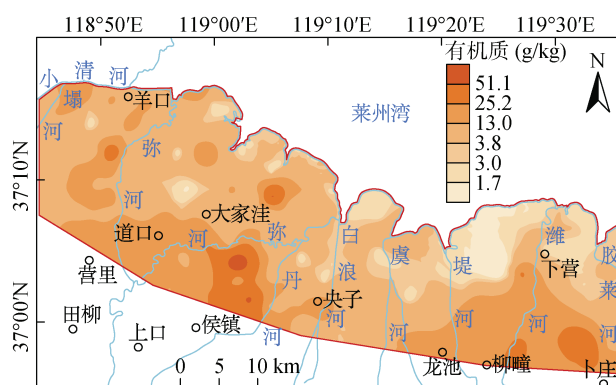


图 8 土壤有机质空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of soil organic matter

2.3.2 土壤养分综合等级划分 研究区土壤养分综合等级空间分布如图 9 所示。土壤养分综合等级总体以四等(较缺乏)为主, 样本数为 136 个, 占 64.15%, 与滨海盐土的分布范围具有高度的耦合性; 三等(中

等)和五等(缺乏)的样本数均为 27 个,均占总样本数的 12.74%,三等分布区土壤类型主要为盐化潮土,五等呈点源状主要分布在沿海区域;二等(较丰富)的样本数为 19 个,占 8.96%,分布范围内土壤类型主要为潮土;一等(丰富)的样本数仅为 3 个,呈点状分布于研究区东南部的二等分布区内。土壤养分的空间异质性受成土母质、土壤类型、地形和地貌等结构性因素以及土地利用方式和施肥管理等随机性因素的共同影响^[26]。从空间分布来看,莱州湾南岸土壤养分水平与土壤类型有显著的关联性。

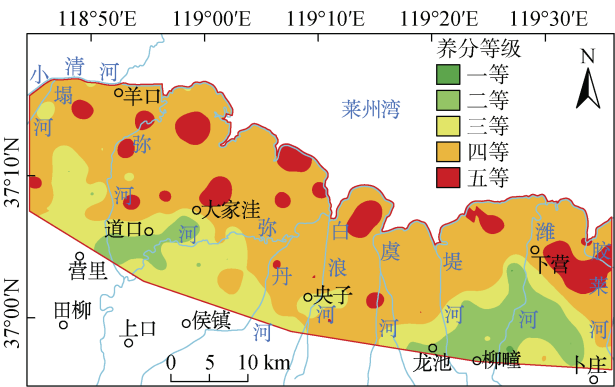


图 9 土壤养分综合等级空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of comprehensive grades of soil nutrients

2.4 土壤指标间相关性

对土壤指标进行 Pearson 相关分析,结果如表 4 所示。全盐量与全氮($r = -0.308, P < 0.01$)、全磷($r = -0.356, P < 0.01$)、全钾($r = -0.345, P < 0.01$)、有机质($r = -0.233, P < 0.01$)呈显著负相关,与前人研究结果一致,即土壤盐分含量越高,养分含量越低^[2]。土壤 pH 与全氮($r = -0.400, P < 0.01$)、全磷($r = -0.215, P < 0.01$)、有机质($r = -0.266, P < 0.01$)呈显著负相关,碱性土壤更易板结,致使肥力降低^[27];但在研究区内对全钾影响不显著。有机质与全氮($r = 0.746, P < 0.01$)、全磷($r = 0.505, P < 0.01$)、全钾($r = 0.165, P < 0.05$)呈显著正相关;全氮与全磷($r = 0.698,$

$P < 0.01$)、全钾($r = 0.362, P < 0.01$),全磷与全钾($r = 0.427, P < 0.01$)均呈显著正相关,说明土壤养分指标间基本可以相互表征。有机质是土壤肥力的基础,随着有机质含量的增加,全氮、全磷和全钾均有一定程度的增加。而研究区土壤有机质缺乏,不利于作物生长,在降盐、改良的基础上,还应采取合理的培肥措施及植被建设^[20]。

2.5 不同土壤类型养分含量

莱州湾南岸土壤类型与土壤盐渍化程度密切相关,表 5 为不同土壤类型的养分指标含量。潮土亚类、盐化潮土、滨海盐土的各养分指标含量依次呈降低趋势(脱潮土主要分布在河滩高地上,在研究区面积小,样本数少,在此不做讨论),滨海盐土的各养分指标含量均显著低于其他土壤类型($P < 0.05$)。潮土亚类成土母质为河流冲积物,地下水位较浅,受地下水升降浸渍潮化影响;盐化潮土由河流、海相沉积物迭次而成,海水浸渍积盐形成的盐土已经历了脱盐作用,为潮土亚类和滨海盐土的过渡地带,土壤含盐量较高,脱盐充分甚至可以演变成潮土,脱离了海水影响,多已垦为农田;滨海盐土成土母质为海渍河流沉积物或海相沉积物,土壤机械组成以粉砂质为主,毛管性强,离海越近,越易受海潮入侵和海水逆河倒灌影响,致使土壤盐分含量越高^[28]。不同盐渍化程度土壤养分指标含量如表 6 所示。随着盐渍化程度加深,土壤养分指标含量均呈降低的趋势,盐渍化等级为盐土时,土壤养分指标含量最低,显著低于轻中度盐渍化等级($P < 0.05$)。莱州湾南岸受地理位置、地形地貌、气候及水文地质条件影响,具有明显的旱季积盐和雨季脱盐的季节性交替^[29],地下水径流滞缓,加之受海水顶托影响出流不畅,盐分在土壤中作垂直运动^[30]。根据离海远近、母质类型、成土年龄、利用方式和土壤质地等特征,土壤盐分和养分呈现有规律的演替。盐渍化程度局限于固定土壤类型,因此,应突出不同土壤类型的主导因素,综合改良中制定可行的规划和措施。

3 结论

1)莱州湾南岸表层土壤盐渍化程度高,全盐量总体呈现北高南低的分布趋势,达到盐土的样本占 30.66%。土壤主要呈碱性,全氮、有机质均值处于缺乏等级,全磷、全钾均值处于中等等级,土壤养分综合等级以四等(较缺乏)为主。研究区内土壤类型的空间分布对土壤养分状况具有制约影响。

表 4 土壤指标间的相关性
Table 4 Correlation between soil indexes

	全盐量	pH	全氮	全磷	全钾
pH	-0.132				
全氮	-0.308**	-0.400**			
全磷	-0.356**	-0.215**	0.698**		
全钾	-0.345**	-0.003	0.362**	0.427**	
有机质	-0.233**	-0.266**	0.746**	0.505**	0.165*

注: *、** 分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

表 5 不同土壤类型的养分指标含量
Table 5 Nutrient contents under different soil types

养分指标	潮土亚类 (n = 12)	脱潮土 (n = 2)	盐化潮土 (n = 35)	滨海盐土 (n = 163)
全氮(g/kg)	1.42 ± 0.72 a	1.51 ± 0.75 a	0.90 ± 0.46 b	0.36 ± 0.24 c
全磷(g/kg)	0.88 ± 0.32 a	0.99 ± 0.03 a	0.94 ± 0.51 a	0.55 ± 0.20 b
全钾(g/kg)	20.4 ± 1.3 ab	20.6 ± 1.8 a	19.3 ± 2.6 ab	16.3 ± 4.0 b
有机质(g/kg)	21.5 ± 10.7 ab	27.5 ± 13.7 a	14.7 ± 7.0 bc	7.7 ± 10.1 c

注：同行不同小写字母表示不同土壤类型差异显著(P < 0.05)，下表同。

表 6 不同盐渍化程度的土壤养分指标含量
Table 6 Soil nutrient contents under different degrees of salinization

养分指标	轻度 (n = 101)	中度 (n = 20)	强度 (n = 26)	盐土 (n = 65)
全氮(g/kg)	0.71 ± 0.52 a	0.56 ± 0.51 a	0.30 ± 0.22 b	0.29 ± 0.16 b
全磷(g/kg)	0.74 ± 0.33 a	0.75 ± 0.51 a	0.55 ± 0.18 b	0.47 ± 0.14 b
全钾(g/kg)	18.4 ± 2.8 a	18.6 ± 1.9 a	15.6 ± 4.6 b	15.1 ± 4.6 b
有机质(g/kg)	13.0 ± 11.1 a	9.2 ± 6.9 ab	9.0 ± 17.0 ab	5.3 ± 3.4 b

2)土壤养分各指标间互呈显著正相关,含量均随着离海岸距离的增加而增加,空间分布特征相似,具有较高的耦合性。土壤养分指标与全盐量均呈显著负相关,除全钾外均与土壤 pH 呈显著负相关,盐分和碱度越高,土壤养分水平越低。

3)不同土壤类型、盐渍化程度对土壤养分形成了差异性影响。土壤类型为滨海盐土的养分指标含量最低。土壤养分指标含量随着盐渍化程度的加深而降低,盐渍化等级为盐土时最低。莱州湾南岸土壤盐分和养分呈现有规律的演替,盐渍化程度局限于固定土壤类型,改良过程中应突出不同土壤类型的主导因素。

参考文献：

[1] Gorji T, Tanik A, Sertel E. Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 507–512.

[2] Cuevas J, Daliakopoulos I N, del Moral F, et al. A review of soil-improving cropping systems for soil salinization[J]. Agronomy, 2019, 9(6): 295.

[3] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 滨海废弃盐田复垦区土壤空间变异及其分区管理研究[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 777–786.

[4] Sheng Y S, He P, Xu X P, et al. A large-scale assessment on spatial variability of potato yield and soil chemical properties in Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 231: 105743.

[5] 陈广泉, 刘文全, 于洪军, 等. 基于 GIS 的莱州湾南岸土壤盐渍化特征分析研究[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(4): 501–507.

[6] 刘宏伟, 许静波, 胡云壮, 等. 潍北平原土壤盐渍化特

征及其影响因素[J]. 中国农村水利水电, 2018(12): 20–24.

[7] 刘文全, 于洪军, 徐兴永. 莱州湾南岸表层土壤含盐量与有机质空间分布的定量研究[J]. 海洋通报, 2014, 33(3): 277–282.

[8] 于得芹, 蒙永辉. 莱州湾南岸地区表层土壤盐分离子分离规律[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 29–35.

[9] 高茂生, 郑懿珉, 刘森, 等. 莱州湾地下卤水形成的古地理条件分析[J]. 地质论评, 2015, 61(2): 393–400.

[10] 常新月, 高茂生, 罗锡明, 等. 山东北部泥质海岸带白浪河地区地下水水化学演化过程[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(3): 64–74.

[11] Yu Z P, Duan X B, Luo L, et al. How plant hormones mediate salt stress responses[J]. Trends in Plant Science, 2020, 25(11): 1117–1130.

[12] 孙娟娟, 张英俊. 植物对盐分空间不均匀分布的形态和生理响应研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7791–7798.

[13] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[14] 中华人民共和国国土资源部. 地球化学普查规范: DZ/T 0011—2015[S]. 北京: 地质出版社, 2015.

[15] Liu H W, Klaus H, Zhou Y X, et al. Features and evaluation of sea/saltwater intrusion in southern Laizhou Bay[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2016, 4(2): 141–148.

[16] 强沥文, 杨振铎, 姜雪锋, 等. 高密度电阻法在耕地破坏鉴定案例中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(12): 2813–2819.

[17] 董达, 王宇婕, 姜培坤, 等. 炭基肥和竹炭对土壤氮素淋失和微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 144–151.

[18] 李红强, 姚荣江, 杨劲松, 等. 盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3915–3924.

- [19] 魏新, 郑小锋, 张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 9–14.
- [20] 黄晶, 孔亚丽, 徐青山, 等. 盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(1): 18–23.
- [21] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548–553.
- [22] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 潍坊市土壤大量营养元素有效量及其影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(1): 218–223.
- [23] Shen Y X, Yu Y, Lucas-Borja M E, et al. Change of soil K, N and P following forest restoration in rock outcrop rich Karst area[J]. CATENA, 2020, 186: 104395.
- [24] 王娜娜, 齐伟, 王丹, 等. 基于样带的滨海盐碱地土壤养分和盐分的空间变异[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1527–1532.
- [25] 陈梦, 刘汉文, 马倩, 等. 轻中度盐碱地土壤有机质空间异质性及影响因素分析——以山东省黄河三角洲农业高新技术示范区为例[J]. 山东农业科学, 2024, 56(1): 139–146.
- [26] 郭琦, 卜崇峰, 李宜坪, 等. 区域尺度生物结皮下伏土壤养分的空间分布特征——以毛乌素沙地为例[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 699–707.
- [27] 王佳文, 彭杰, 纪文君, 等. 基于电磁感应数据的南疆棉田土壤 pH 反演研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1293–1302.
- [28] 贾悦, 李玉凤, 张玥, 等. 围垦后滨海湿地水土盐度对土地利用时空演变的响应[J]. 地理研究, 2023, 42(7): 1892–1903.
- [29] 刘文全, 于洪军, 徐兴永. 莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1213–1222.
- [30] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837–845.