

## 江苏东台盐碱耕地综合肥力特征及其影响因素<sup>①</sup>

王志旺<sup>1,2</sup>, 王世航<sup>1</sup>, 徐灵颖<sup>2\*</sup>, 陈玉琪<sup>2</sup>, 许梦乾<sup>2,3</sup>, 孙佳蓓<sup>1,2</sup>, 罗越<sup>2</sup>, 赵旭<sup>2</sup>

(1 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽淮南 232001; 2 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3 安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246133)

**摘要:** 为研究滨海滩涂盐碱耕地土壤肥力状况, 结合围垦年限采集江苏盐城 108 个样点, 采用地统计学方法分析土壤 pH、含盐量(TS)和养分指标的空间分布特征, 采用改进后的内梅罗指数法计算土壤综合肥力, 阐明其关键影响因素。结果表明: ①除土壤 pH、TS、全磷(TP)呈中等的空间相关性外, 其他土壤养分指标均有强烈的空间自相关性, 说明土壤养分受自然条件约束更为显著; ②土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)含量从西向东逐渐减少, 而土壤 pH、TS、全钾(TK)、速效钾(AK)则呈递增趋势; ③滨海滩涂盐碱耕地土壤综合肥力较差, 开垦年限、盐碱障碍和养分因素共同解释了 93% 的变异, 其中 SOM 对土壤综合肥力指数(IFI)的影响最为显著。无论是短期、中期, 还是长期围垦, SOM 均与 IFI 呈显著正相关, 说明 SOM 是滨海滩涂盐碱耕地土壤综合肥力的基础。因此, 滨海盐碱耕地改良要注意有机调控, 提高土壤有机质含量, 最终增加土壤养分库容。

**关键词:** 滨海盐碱地; 地统计学; 内梅罗综合指数; 土壤综合肥力评价

中图分类号: S158.2 文献标志码: A

## Comprehensive Fertility Characteristics and Influencing Factors of Saline-alkali Cultivated Land in Dongtai, Jiangsu Province

WANG Zhiwang<sup>1,2</sup>, WANG Shihang<sup>1</sup>, XU Lingying<sup>2\*</sup>, CHEN Yuqi<sup>2</sup>, XU Mengqian<sup>2,3</sup>, SUN Jiabei<sup>1,2</sup>, LUO Yue<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>2</sup>

(1 School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2 Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 School of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246133, China)

**Abstract:** To investigate soil fertility status of coastal tidal flat saline-alkali farmlands in Yancheng City, Jiangsu Province, a total of 108 (0–20 cm) soil samples were collected based on the duration of reclamation, soil pH, total salinity (TS) and nutrients were measured, their spatial distribution characteristics were analyzed using geostatistical methods, soil integrated fertility indexes (IFI) were calculated with the modified Nemerow index method, and the primary factors influencing IFI were elucidated. The results showed that: 1) The spatial correlations of soil pH, TS and total phosphorus (TP) were moderate, while the block-base ratio of soil nutrients exhibited strong spatial autocorrelation, which suggested that soil nutrients were more significantly constrained by natural conditions. 2) The contents of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN) and alkaline-hydrolyzable nitrogen (AN) gradually decreased from west to east, which were contrary to that of soil pH, TS, total potassium (TK) and available potassium (AK). 3) Soil IFI was lower, with reclamation duration, salinity-alkalinity barriers, and nutrient factors accounting for 93% of IFI variation. SOM had the most significant impact on soil IFI. SOM was significantly positively correlated with soil IFI in all short, medium and long-term reclamation years, indicating that SOM acted as the fundamental factor for soil IFI. Hence, the enhancement of coastal saline-alkali farmland should be focused on the organic regulation in order to elevate the content of soil organic matter, and ultimately promote the capacity of soil nutrient reservoir.

**Key words:** Coastal saline-alkali lands; Geostatistics; Nemerow composite index; Soil comprehensive fertility evaluation

①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440000)和江苏省基础研究专项资金(自然科学基金)面上基金项目(BK20242107)资助。

\* 通信作者(xulingying@issas.ac.cn)

作者简介: 王志旺(1997—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事数字土壤制图与土壤资源评价研究。E-mail: wangzhiwang0710@163.com

盐碱地是重要的后备耕地资源,是实现国家粮食安全的重要保障。我国有  $3.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$  的盐碱地,占世界盐碱地总面积的 4% 左右<sup>[1-2]</sup>。其中,滨海滩涂盐碱地是我国盐碱地的重要组成部分,总面积达  $1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[3-4]</sup>,受海潮和海水型地下水的双重作用,土壤水盐运动活跃,盐碱化持久反复,土壤 pH 高,有机质含量低,水肥保蓄能力弱,造成粮食单产低且不稳,严重制约了耕地地力的提升<sup>[5]</sup>。因此,合理高效地利用滨海滩涂盐碱耕地资源对于保障粮食安全、端牢中国饭碗具有重要的战略意义。

虽然盐碱消障是盐碱地产能保障的前提,但土壤肥力仍是决定土地生产力的关键所在,其状况良好是农业可持续发展的前提。土壤综合肥力是衡量土壤能够提供作物生长所需的各种养分的能力,是土壤各种基本性质的综合表现<sup>[6]</sup>,但由于不同学者对土壤肥力的内涵定义并不一致,目前尚未形成统一的土壤肥力评价标准方法<sup>[7]</sup>。土壤肥力因子判别方面,通常认为酸碱度、有机质及氮磷钾含量等是肥力的重要表现<sup>[8]</sup>,此外还需要根据土地利用方式的独特性和区域差异选取合适的指标<sup>[9]</sup>。评价方法是评价的基础,国内外进行土壤肥力综合质量评价的方法较多,目前主流方法包括内梅罗指数法、因子分析法、相关系数法、模糊综合评价法、层次分析法、主成分分析法、聚类分析法等<sup>[10-17]</sup>,其中运用改进的内梅罗指数法进行土壤综合肥力评价,可较大程度减少人为的主观性<sup>[18]</sup>。包耀贤等<sup>[19]</sup>对比了因子分析法、相关系数法和内梅罗指数法在长期试验土壤综合肥力评价的应用效果后也发现,内梅罗指数法得到的综合肥力评价指数和作物产量之间的相关性更好,评价结果灵敏度较高。此外,现有的土壤肥力评价方法仍是基于土壤零散指标数据整合的数理统计,无法全面直观反映土壤养分和综合肥力的地理空间分布特征信息,存在一定的局限性。

基于此,本研究以江苏滨海滩涂盐碱耕地作为主要研究对象,采用普通克里格插值法分析盐碱耕地土壤含盐量、酸碱度、有机质养分的空间分布特征,以此栅格数据集为基础,利用改进的内梅罗指数法计算土壤综合肥力指数,并通过 Mantel 检验、多元回归阐明其影响机制,以期为盐碱耕地养分管理和盐碱障碍土壤改良提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省盐城东台市( $32^\circ 34' 32'' \text{N} \sim 33^\circ 01' 17'' \text{N}$ 、 $120^\circ 06' 12'' \text{E} \sim 120^\circ 58' 03'' \text{E}$ ),临近黄海

(图 1A、1B),平均海拔约为 3~5 m,地势平坦,大多为平原地貌。属于北亚热带湿润季风气候区,四季分明,温暖湿润,年均气温约  $15^\circ \text{C}$ ,年平均日照为 2 080 h,年均降水量为 1 000 mm,主要集中在夏季的梅雨期和台风季节。水系发达,河网密布,属于淮河流域东部水域,拥有丰富的地下水资源和沿海滩涂湿地。土壤类型多样,包括潮土、盐碱土、沙质土等,沿海区域土地资源广阔,围垦面积较大,农作物以种植水稻、小麦、大麦、油菜等粮油作物为主。

### 1.2 样品采集与处理

前期根据当地农户调查信息以及东台县志资料,确定了研究区盐碱耕地的围垦年限范围,分为短期(开垦年限 $<10 \text{ a}$ )、中期(开垦年限  $10 \sim 30 \text{ a}$ )、长期(开垦年限 $>30 \text{ a}$ )三类。于 2024 年 5 月对每个围垦年限的盐碱耕地进行样品采集,每个围垦年限范围至少保证采集 5 个以上样点,同时需兼顾海岸线距离,最终共采集 108 个样点(图 1C)。当季种植作物均为大麦。采样时用 GPS 进行定位,采用“S”形采集 0~20 cm 土壤混合为一份;采集土样风干、过筛并去除石块、肉眼可见的植物残体等用于土壤指标测定。

### 1.3 测定指标与方法

土壤指标测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[20]</sup>。土壤 pH 采用电位法测定(水土质量比为 5:1)。土壤可溶性八大离子中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  采用 ICP-MS 测定,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  采用离子色谱仪测定,  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  采用双指示剂-中和滴定法测定。土壤含盐量(TS)通过可溶性八大离子含量加和得到。土壤有机质(SOM)采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定,全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法测定,全钾(TK)采用酸溶-原子吸收法测定,碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定,有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾(AK)采用火焰光度计法测定。

### 1.4 数据处理与分析

利用 SPSS 27.0 软件对数据进行描述性统计分析。使用 GS+9.0 软件进行半方差函数分析,按决定系数越接近 1、残差较小原则<sup>[21]</sup>,拟合出土壤指标数据的最优半变异函数模型,并且利用 ArcGIS 10.7 软件进行普通克里格插值绘制出其空间分布图,得到该地区土壤理化性质的空间分布情况。参照秦明周和赵杰<sup>[22]</sup>的标准化方法,利用隶属度函数法结合栅格计算器得到各个评价因子的标准化栅格图层;标准化处理后土壤肥力指标的分级标准参照《全国第二次土壤普查养分分级标准》<sup>[23]</sup>和前人研究成果<sup>[8,18,22]</sup>,确定土壤各评价指标的分肥力系数( $\text{IFI}_i$ );用改进的内

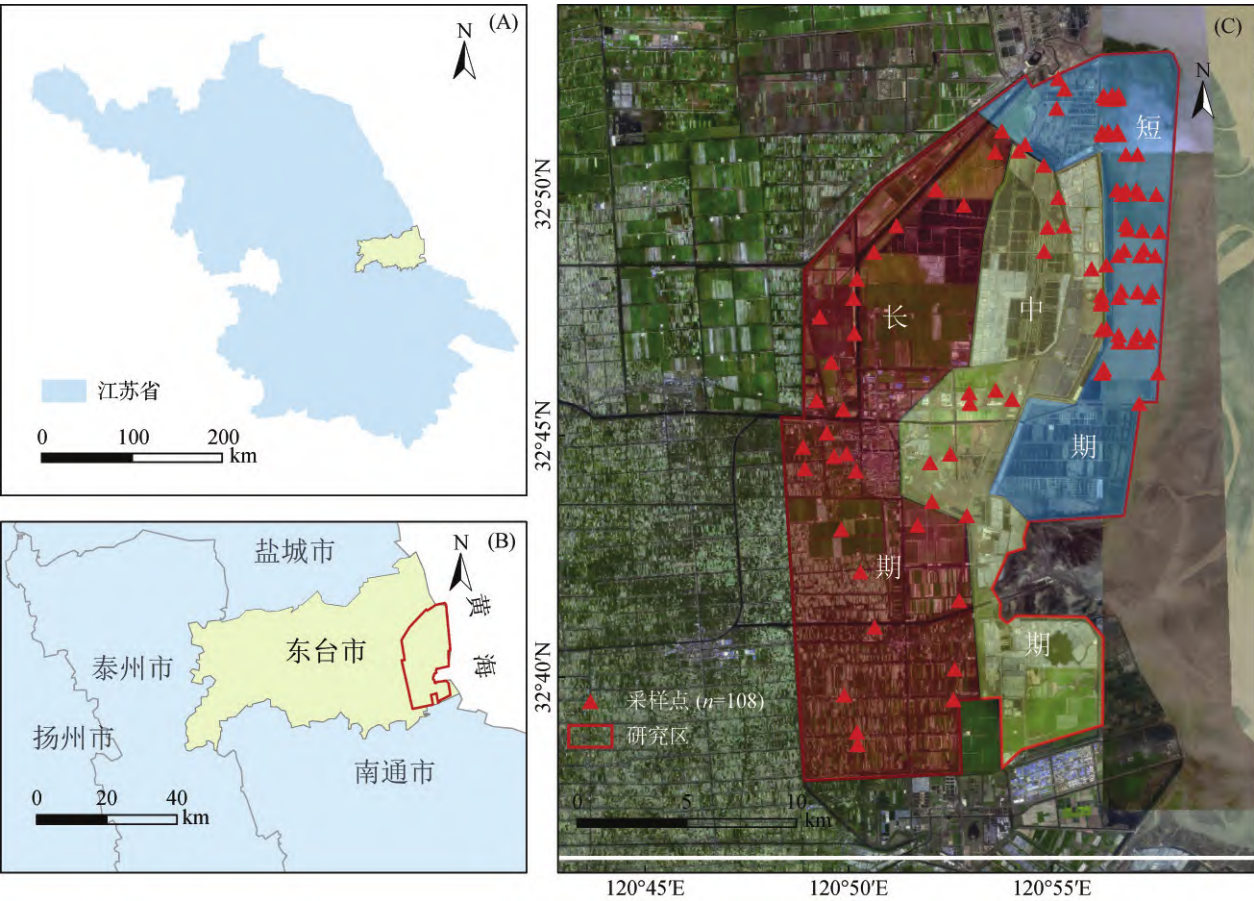


图 1 研究区及土壤采样点分布图  
Fig.1 Study area and soil sampling sites

梅罗综合指数法<sup>[24]</sup>计算土壤综合肥力指数(IFI)。使用 R 语言进行 Mantel 检验、多元回归分析,阐明影响土壤综合肥力的关键影响因素。

分肥力系数  $IFI_i$  计算公式如下:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{X}{X_a} & X \leq X_a \\ 1 + \frac{X - X_a}{X_c - X_a} & X_a < X \leq X_c \\ 2 + \frac{X - X_c}{X_p - X_c} & X_c < X \leq X_p \\ 3 & X > X_p \end{cases} \quad (1)$$

其中本研究区土壤呈碱性, pH、TS 与土壤肥力呈负相关, 所以计算公式如下:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{X_a}{X} & X > X_a \\ 1 + \frac{X_a - X}{X_a - X_c} & X_c < X \leq X_a \\ 2 + \frac{X_c - X}{X_c - X_p} & X_p < X \leq X_c \\ 3 & X \leq X_p \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $IFI_i$  是评价因子标准化系数;  $X$  为测定值;  $X_a$ 、 $X_c$  和  $X_p$  值参照表 1。

表 1 土壤综合肥力指数(IFI)评价因子的分级标准  
Table 1 Classification standards of soil indicators for soil integrated fertility index (IFI)

| 评价因子       | $X_p$ | $X_c$ | $X_a$ |
|------------|-------|-------|-------|
| pH         | 7.5   | 8.0   | 8.5   |
| TS (g/kg)  | 1     | 2     | 4     |
| SOM (g/kg) | 20    | 10    | 6     |
| TN (g/kg)  | 1     | 0.75  | 0.5   |
| TP (g/kg)  | 0.6   | 0.4   | 0.2   |
| TK (g/kg)  | 15    | 10    | 5     |
| AN (mg/kg) | 90    | 60    | 30    |
| AP (mg/kg) | 10    | 5     | 3     |
| AK (mg/kg) | 100   | 50    | 30    |

采用改进的内梅罗综合指数法计算土壤综合肥力指数:

$$IFI = \sqrt{\frac{IFI_{imin}^2 + IFI_{imean}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

式中: IFI 为土壤综合肥力指数, IFI 值介于 0 ~ 3,

值越大表示土壤综合肥力越高;  $IFI_{imin}$  为各分系数最小值,  $IFI_{imean}$  为各系数平均值;  $n$  为评价因子的个数。依据表 2 对土壤综合肥力等级进行划分。

表 2 土壤综合肥力指数(IFI)分级标准  
Table 2 Grading criteria for soil IFI

| I 级        | II 级      | III 级     | IV 级      | V 级        |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 优          | 良         | 中         | 差         | 极差         |
| $\geq 2.5$ | 2.5 ~ 2.0 | 2.0 ~ 1.5 | 1.5 ~ 1.0 | $\leq 1.0$ |

2 结果与分析

2.1 土壤 pH、盐分和养分描述性统计特征

由表 3 可知:滨海滩涂盐碱耕地土壤指标的变异

系数为  $TS > AK > AP > SOM > TN > TP > TK > AN > pH$ 。其中,  $AN$  和  $pH$  为弱变异(变异系数小于 10%)<sup>[25]</sup>, 其余指标属于中等变异。经单一样本 K-S 方法检验, 土壤  $TP$ 、 $TK$ 、 $AP$ 、 $pH$  符合正态分布,  $TN$ 、 $AP$  属于幂指数正态分布,  $AN$ 、 $AK$ 、 $TS$  符合对数正态分布。土壤  $pH$  均值为 8.4,  $TS$  含量均值为 1.82 g/kg, 说明采样点土壤大多属于轻度盐碱土壤。根据《全国第二次土壤普查养分分级标准》<sup>[23]</sup>, 采样点土壤  $SOM$ 、 $TN$  平均含量处于 V、VI 级, 属于差、较差水平;  $AN$  平均含量处于 IV 级, 属于适宜水平;  $TP$ 、 $TK$ 、 $AP$ 、 $AK$  处于 II、III 级, 属于较适宜到丰富以上水平。表明江苏滨海盐碱地  $SOM$  和  $TN$  显著缺乏。

表 3 盐碱耕地土壤指标描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of soil indicators of saline-alkali cultivated land

| 指标         | 最小值   | 最大值    | 平均值    | 标准差    | 变异系数(%) | 偏度    | 峰度    |
|------------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|-------|
| pH         | 7.54  | 9.07   | 8.40   | 0.31   | 3.69    | -0.65 | 0.08  |
| TS (g/kg)  | 0.30  | 13.45  | 1.82   | 2.16   | 118.68  | 3.11  | 11.48 |
| SOM (g/kg) | 1.55  | 36.89  | 9.56   | 5.91   | 61.82   | 1.71  | 3.68  |
| TN (g/kg)  | 0.03  | 1.44   | 0.47   | 0.25   | 53.19   | 1.04  | 1.73  |
| TP (g/kg)  | 0.37  | 1.13   | 0.67   | 0.12   | 17.91   | 0.59  | 1.51  |
| TK (g/kg)  | 15.52 | 25.05  | 18.74  | 2.38   | 12.70   | 0.62  | -0.53 |
| AN (mg/kg) | 15.65 | 245.43 | 71.88  | 5.67   | 7.89    | 1.01  | 0.18  |
| AP (mg/kg) | 1.65  | 81.65  | 26.29  | 18.59  | 70.71   | 0.6   | -0.03 |
| AK (mg/kg) | 35.05 | 576.21 | 174.08 | 129.77 | 74.55   | 1.45  | 1.32  |

2.2 土壤 pH、盐分和养分的半方差模型拟合

对各土壤指标进行半方差模型拟合, 就决定系数( $R^2$ )和残差平方和(RSS)而言, 9 项土壤指标的半方差函数拟合较好, 说明 9 项指标均具有明显的空间结构特征(表 4)。其中, 土壤  $pH$  采用球面模型进行拟合, 土壤  $TN$ 、 $TP$ 、 $AP$ 、 $AK$  采用指数模型, 土壤  $TS$ 、 $SOM$ 、 $TK$ 、 $AN$  采用高斯模型进行拟合。块金值表示由随机因素引起的变异; 基台值表示系统内总的变异; 块基比指空间变异程度, 表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比例<sup>[26-27]</sup>。当块基比 $<25\%$ , 表明系统具有强烈的空间自相关

性; 块基比  $25\% \sim 75\%$  时, 为中等空间相关性; 当块基比 $>75\%$  时, 为弱空间相关性。土壤  $pH$ 、 $TP$ 、 $TS$ 、块基比为  $25.00\%$ 、 $25.00\%$ 、 $48.70\%$ , 说明它们均具有中等的空间相关性, 其空间变异受结构性因素和随机性因素的共同影响。 $SOM$ 、 $TN$ 、 $TK$ 、 $AN$ 、 $AP$ 、 $AK$  的块基比在  $6.67\% \sim 17.43\%$ , 具有强空间自相关性, 说明上述指标主要受结构性因素的影响<sup>[28]</sup>。变程结果表明,  $SOM$  含量的变程为 33 862 m, 空间自相关距离最大; 土壤  $TN$ 、 $TK$ 、 $AP$  的变程小, 空间相关距离较小, 与其强空间自相关性的结论一致。

表 4 盐碱耕地土壤指标半方差分析

Table 4 Analysis of semi-variance of soil indicators of saline-alkali cultivated land

| 指标  | 模型   | 块金值   | 基台值   | 块基比(%) | 变程(m)  |
|-----|------|-------|-------|--------|--------|
| pH  | 球面模型 | 0.026 | 0.104 | 25.00  | 4 170  |
| TS  | 高斯模型 | 0.504 | 1.035 | 48.70  | 15 606 |
| SOM | 高斯模型 | 0.172 | 0.987 | 17.43  | 33 862 |
| TN  | 指数模型 | 0.005 | 0.035 | 14.29  | 2 100  |
| TP  | 指数模型 | 0.010 | 0.040 | 25.00  | 13 230 |
| TK  | 高斯模型 | 0.001 | 0.015 | 6.67   | 3 170  |
| AN  | 高斯模型 | 0.190 | 1.557 | 12.20  | 24 283 |
| AP  | 指数模型 | 0.620 | 4.090 | 15.16  | 2 820  |
| AK  | 指数模型 | 0.103 | 0.745 | 13.83  | 26 880 |

2.3 土壤 pH、盐分和养分的空间分布

如图 2 所示，滨海滩涂盐碱耕地土壤 pH 和 TS 含量的分布相似，自西向东逐渐增加；这是由于采样点向内陆延伸，海水顶托对土壤含盐量的影响逐渐减弱。土壤 SOM、TN、AN 含量均呈现从西向东逐渐

减少的趋势。土壤 SOM 和 TN 含量大多低于 10 g/kg 和 0.3 g/kg，为 V、VI 级，属于较差水平；土壤 AN 含量大多为 60 ~ 120 mg/kg，属于 III、IV 级，处于适宜、较适宜水平。土壤 TP、AP 含量总体上呈现出由内部向四周递增的趋势，其中 TP 大多为 III、IV

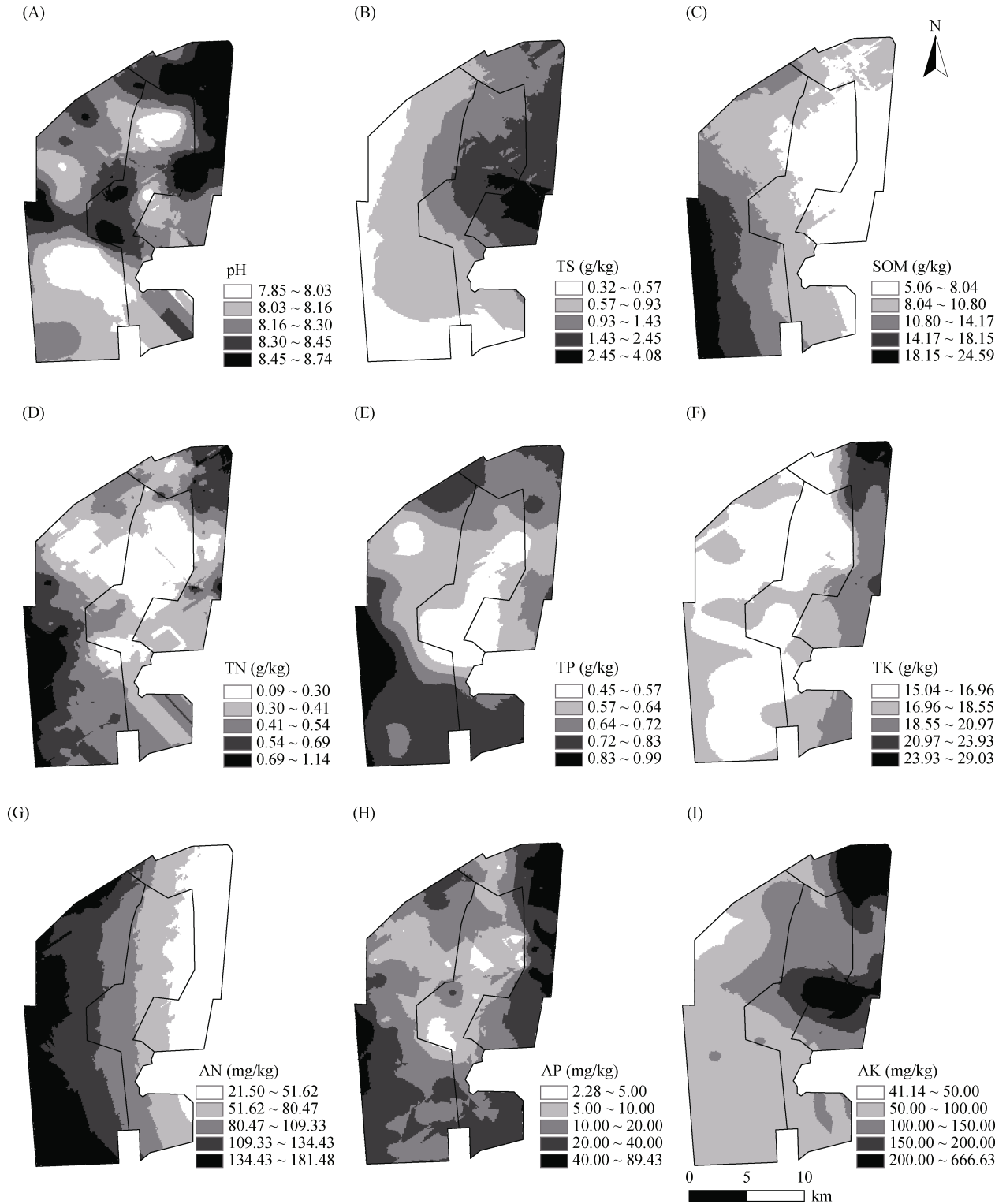


图 2 盐碱耕地土壤指标空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of soil indicators of saline-alkali cultivated land



级,处于适宜、较适宜水平;AP 大多为Ⅳ级,处于适宜水平。土壤 TK、AK 含量呈自西向东逐渐增加的趋势,TK 整体处于较适宜-极丰富水平,AK 处于适宜-极丰富水平。

2.4 土壤综合肥力质量评价

结果表明,研究区盐碱地土壤综合肥力指数为 1.18~2.22,主要集中于 1.25~1.75(图 3),平均值为

1.62,肥力平均等级为Ⅲ级,说明滨海滩涂盐碱地土壤综合肥力处于中等水平。进一步根据表 2 划分标准可知,研究区土壤综合肥力以Ⅲ、Ⅳ级为主,二者的面积占比分别为 71.46%、25.20%。此外,由图 3 可知,离海岸线越远,开垦年限越长,滨海滩涂盐碱耕地土壤综合肥力指数越高,表明盐碱地开垦过程中的一些调控改良措施有助于提高土壤综合肥力。

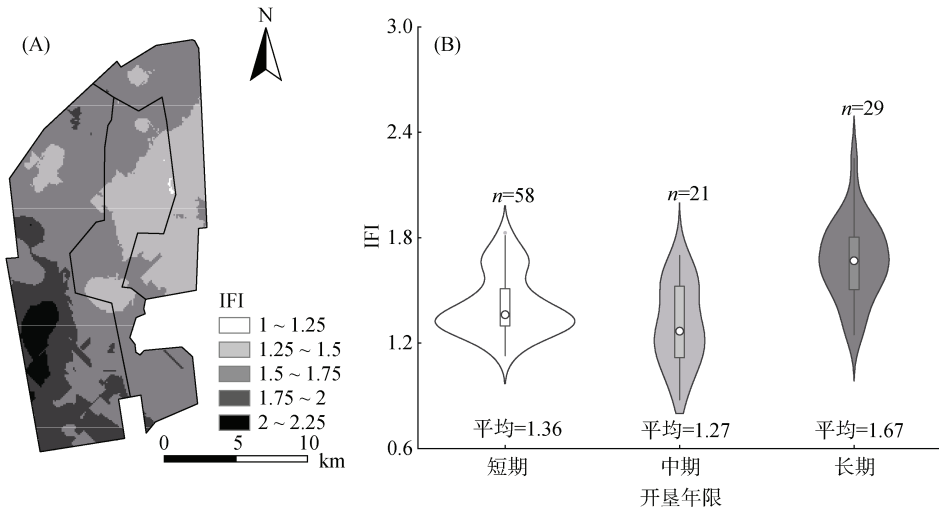
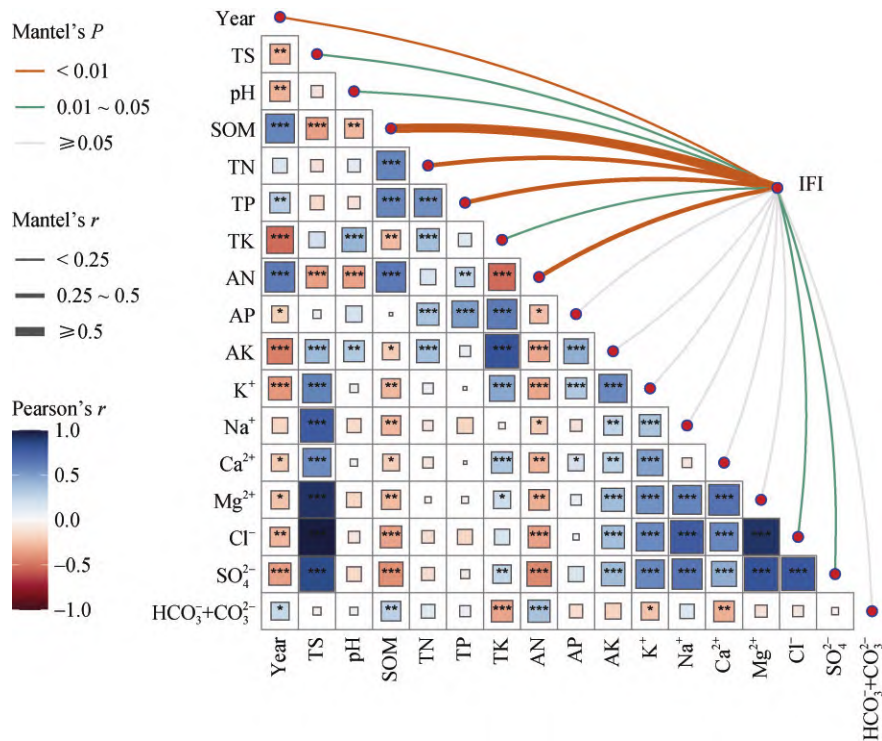


图 3 盐碱耕地土壤综合肥力分布特征  
Fig. 3 Distribution characteristic of soil IFI of saline-alkali cultivated land

2.5 土壤综合肥力的影响因素

采用 Mantel 检验评估影响土壤综合肥力指数的

关键因素,分析结果如图 4 所示。开垦年限(Year)、SOM、TN、TP、AN、pH、Cl<sup>-</sup>、TS、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、TK 等



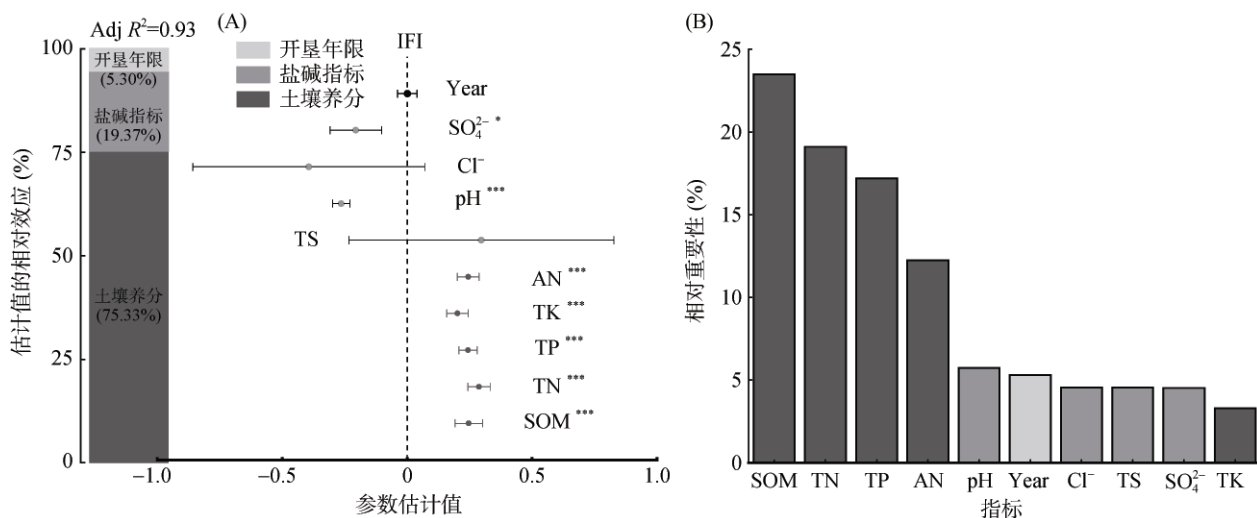
(\*, \*\*, \*\*\* 分别表示达  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$  显著水平,下同)

图 4 盐碱耕地土壤环境因子与综合肥力指数的 Mantel 检验

Fig.4 Mantel test of correlation between soil environmental factors and IFI of saline-alkali cultivated land

指标与 IFI 显著相关。进一步通过多元回归模型综合分析开垦年限、盐碱障碍(含盐量和离子组成)和土壤养分对土壤综合肥力质量的影响。由图 5A 可知, 上述指标共同解释了土壤综合肥力指数 93% 的变异。其中, 土壤养分指标对土壤综合肥力指数总解释方差的相对贡献最大, 为 75.33%; 其次, 盐碱障碍对土壤综合肥力指数总解释方差的相对贡献为 19.37%。

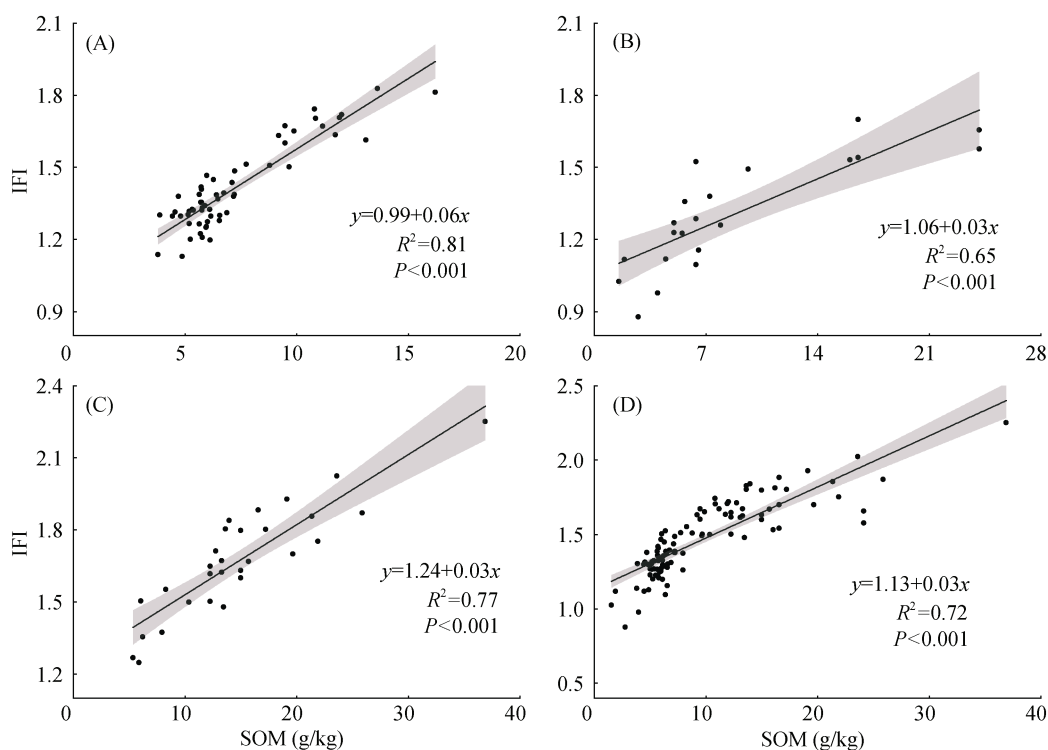
就土壤养分而言, AN、TK、TP、TN、SOM 均对 IFI 有显著正向作用; 且 SOM 的相对重要性最大, 为 23.48%(图 5B), 这说明 SOM 是影响滨海盐碱地土壤肥力的关键因素。此外, 图 5 结果显示, 开垦年限的影响也不能完全忽视, 本研究中开垦年限对土壤综合肥力指数总解释方差的影响最小, 仅为 5.30%, 可能与土壤有机质的改善效果不明显有关。如图 6 所示,



(A. 平均参数估计(标准化回归系数)及其 95%置信区间; B. 指标相对重要性)

图 5 开垦年限、土壤盐碱障碍和养分指标对土壤综合肥力指数的影响

Fig. 5 Effects of cultivation year, salinity-alkali barrier and soil nutrients on soil IFI



(A: 短期; B: 中期; C: 长期; D: 全部)

图 6 不同开垦年限的盐碱耕地土壤有机质与土壤综合肥力指数相关性

Fig. 6 Correlation between SOM and soil IFI of saline-alkali cultivated lands with different reclamation durations

无论是短期开垦、中期开垦,还是长期开垦,SOM和IFI均呈极显著正相关( $P<0.001$ ),且斜率 $K$ 值高度相近。综上可知,SOM含量会显著影响滨海滩涂盐碱耕地的综合肥力质量,后续盐碱地改良研究需要注意有机质调控和养分管理。

### 3 讨论

滨海滩涂盐碱耕地肥力变化受自然资源禀赋和人为耕作管理的双重作用影响,土壤肥力调查及评价是土壤资源合理利用的重要依据。本研究通过在江苏滨海滩涂盐碱地的大规模调研发现,除土壤pH、TP、TS的空间变异受结构性因素和随机性因素的共同影响外,SOM、TN、TK、AN、AP、AK等养分指标的块基比在6.67%~17.43%,主要受结构性因素的影响(表4)。这意味着滨海滩涂盐碱障碍受到耕作、灌溉等人为活动和地形、水文等自然条件的共同作用;而土壤肥力提升目前主要受制于成土母质、土壤类型、地形等自然条件<sup>[27]</sup>。潘昱伶等<sup>[28]</sup>在黄河宁夏段典型滩涂土壤的研究显示,土壤SOM、TN、TP、TK、AN、AP的块基比均小于25%,表现为强烈的空间自相关性,也证实了盐碱地土壤养分主要受自然资源约束。此外,姚荣江等<sup>[29]</sup>在黄河三角洲地区典型地块土壤盐渍剖面的研究也发现,土壤含盐量呈“积盐-淋溶”的季节性动态变化趋势。

从空间分布格局来看,SOM、TN、AN含量从西向东逐渐减少,pH、TS、TK、AK含量自西向东逐渐增加(图2)。Mental分析结果表明,SOM、AN与围垦年限呈显著正相关关系( $P<0.001$ ),与土壤pH、TS呈显著负相关关系(图4)。这说明离海岸线越近,围垦年限越短,土壤pH和TS越高,土壤碳氮含量越低<sup>[30-31]</sup>。这主要是由于以下两方面原因:一方面,盐基离子增加会导致土壤颗粒发生崩解、膨胀和分散,土壤团聚结构破坏,土壤碳氮库难存蓄<sup>[32]</sup>;另一方面,随着土壤盐基离子增加,盐基离子产生的渗透压抑制土壤微生物活性,延缓土壤养分周转,导致土壤碳氮库容下降<sup>[33]</sup>。此外,土壤盐碱化对植物生长等毒害也会减少土壤凋落物数量,影响土壤碳氮库容量。土壤TK、AK含量的空间分布和pH、TS较为一致,可能是由于沿海地区受海潮咸水顶托、海水型地下水反复浸润,造成海水中丰富的钾元素会随地下水或者地表水进入土壤,在土壤富集(图2)。表1结果也显示,根据《全国第二次土壤普查养分分级标准》,本研究区的TK、AK平均含量分别处于III、II级,属于丰富到较适宜水平,块基比结果也证实了

沿海地区的地形地貌特征可能是影响土壤钾素分布的重要原因。此外,图4结果表明,土壤TK、AK和TS、pH均呈现显著正相关关系。由此可见,滨海滩涂盐碱耕地钾素丰富,围垦过程中可适当减少钾肥施用。值得注意的是,本研究中土壤TP、AP含量呈由内部向四周递增的空间分布趋势,且呈斑块状。土壤TP、AP的块基比明显高于其他养分指标,说明土壤磷素的空间分布特征可能与人为耕作管理有关。盐碱耕地磷肥利用率低<sup>[2]</sup>,农户为了稳产增收通常投入大量磷肥,导致土壤磷过量;而高pH条件下土壤磷易与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 结合从而被固定,土壤磷素大量累积。Mental检验结果表明,围垦年限与土壤TP呈显著正相关关系( $P<0.01$ ),与土壤AP呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),这一结果也从侧面论证了人为管理对滨海盐碱耕地磷素供应的重要驱动作用。

本文进一步通过改进的内梅罗指数法探讨了滨海盐碱耕地的土壤综合肥力特征,结果表明,研究区IFI平均值为1.62,肥力平均等级为III级,处于中等水平(图3)。乔俊等<sup>[8]</sup>通过模糊综合评价和改进的内梅罗指数法分析了山西河津黄河盐碱滩土壤综合肥力现状,结果表明,该地区的土壤综合肥力指数为0.72~0.78,低于本研究结果。这可能与气候差异有关,本文研究区属于北亚热带湿润季风气候区,年均降水量为1 000 mm;而山西河津黄河盐碱地属于温带大陆性气候区,年均降水量为545 mm,与河套盐碱区相似,属于半干旱区,降水少,蒸发量大,水资源相对缺乏,土壤盐分上移形成表聚。此外,通过图7可知,土壤综合肥力随着盐分(TS、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ )含量的增加逐渐降低。值得注意的是,本研究中的土壤含盐量范围为0.30~13.49 g/kg,河津盐碱地土壤含盐量为0.9~5.1 g/kg,而河津盐碱地SOM、TN、AP、AK却显著低于本研究结果,侧面反映了土壤盐化障碍可能并不直接影响土壤养分库容,而是通过物理-化学-生物的综合调控影响土壤养分库容。本研究结果表明,土壤养分指标对综合肥力指数总解释方差的相对贡献最大,其中SOM的相对重要性又最大(图5)。这与乔俊等<sup>[8]</sup>研究表明SOM、TN是关键养分限制因子的观点一致,说明SOM是土壤地力的核心,要实现土壤肥力改善,除了要解决盐碱障碍外,必须要快速增加SOM储量。施用外源有机物质(如有机肥、腐植酸等)是最常见的土壤肥力提升方法。例如,李玉等<sup>[34]</sup>在滨州市无棣县渤海粮仓试验基地的连续两年定位试验发现,有机肥替代化肥比例越大,SOM含量越高,土壤养分供应能力越强,作物增产效果越



好。马栗炎等<sup>[35]</sup>在江苏省东台市弼港镇条子泥垦区,以轻中度盐碱障碍土壤为研究对象开展田间试验,结果显示黄腐酸结合 300 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥处理改良效果最好,使小麦季和水稻季土壤总有机碳积累量分别增加 31.0%、120%,其增效机制可能源于黄腐酸活性官能团对盐分离子的络合作用,以及氮素供应对作物根系生长的协同促进效应。通过分析不同围垦年限 SOM 含量和 IFI 的相关关系(图 6)可知,无论是短期开垦、中期开垦,还是长期开垦, SOM 和 IFI 均呈极显著正相关( $P<0.001$ ),且斜率  $K$  值高度相近,从侧面说明滨海滩涂盐碱障碍土壤 SOM 含量增加非常重要。然而,当土壤到达一定的有机碳量瓶颈后,增量不增效,盲目添加外源有机物质会导致成本增加,经济效益降低;同时各类有机物质的性质并不明确,改良效果也存在争议。高宏哲等<sup>[36]</sup>对比了水稻秸秆还田、

腐熟鸡粪、腐熟猪粪和生物质炭对苏打盐碱土壤水稳性团聚体的影响,发现各有机培肥措施均增加土壤大团聚体比例,但对团聚体组分有机碳含量贡献度效果有显著差别,生物质炭相较于其他有机物料更能够提升大团聚体和微、粉黏粒团聚体有机碳含量,改善土壤肥力。姜雪等<sup>[37]</sup>对比了有机肥、粉煤灰、生物质炭、糠醛渣、蚯蚓粪、腐植酸及其复配处理等 11 种土壤有机调理剂对河西灌区盐碱地土壤肥力的影响,结果显示,生物质炭+糠醛渣显著增加了土壤 SOM、TN、TP、TK 含量。但也有研究认为动物源有机物质含盐量高、生物质炭 pH 高并不适用于盐碱地土壤改良。综上所述,滨海滩涂盐碱耕地肥力与土壤有机质密切相关,然而不同的有机物质类型会显著影响改善效果,因此后续江苏滨海盐碱地改良研究需要注意有机量质调控和养分管理。

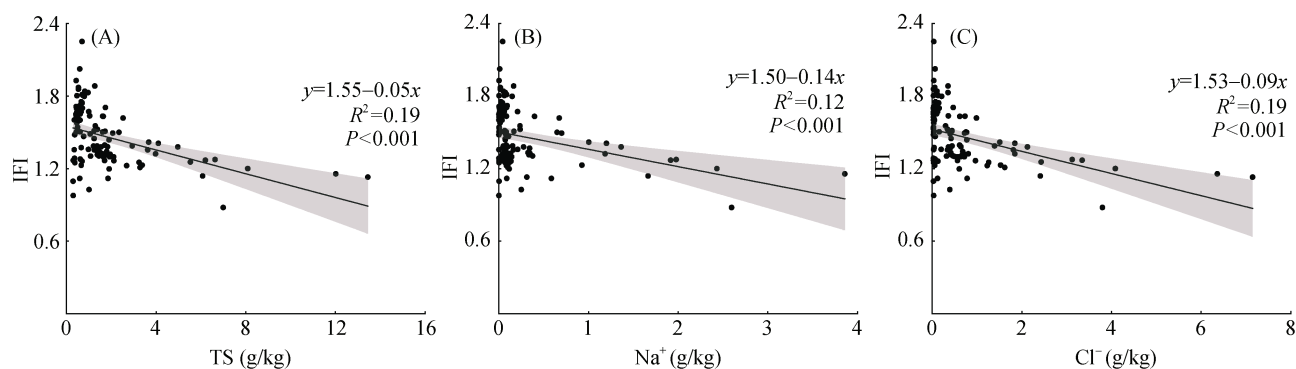


图 7 盐碱耕地土壤盐分(TS、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>)与土壤综合肥力指数相关性

Fig.7 Correlation between soil salinity (TS, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>) and soil IFI of saline-alkali cultivated land

应当指出,本文重点关注了江苏滨海滩涂盐碱耕地养分区域分布特征和土壤综合肥力评价,明确了其关键限制因素;然而,不同气候区域的盐碱耕地土壤肥力存在较大差异,且盐分(TS、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>)年季和季节性动态变化也会影响土壤综合肥力,土壤养分管理策略仍需深入探究。未来有必要扩大研究范围,通过“点-面”结合绘制全国乃至全球尺度的盐碱障碍耕地养分图谱,并进一步围绕“有机质显著影响盐碱耕地土壤肥力”这一观点,分类分策构建快速增碳有机调控养分管理策略。

## 4 结论

1) 土壤养分空间分异特征显示:除 pH、TS、TP 外, SOM、TN、TK、AN、AP、AK 等指标的空间变异主要受结构性因素支配,表明成土母质、地形地貌等自然本底条件是制约该区域土壤养分累积的关键因子。

2) 空间分异格局呈现显著海陆梯度特征,随着

采样点与海岸线距离的缩短(自西向东), SOM、TN、AN 含量呈现梯度递减趋势,而 pH、TS、TK、AK 则呈递增态势。TP 与 AP 含量呈现由研究区中部向四周辐射递增的分布特征,这可能与农田管理措施的空间异质性密切相关。

3) 土壤综合肥力指数(IFI)均值为 1.62,参照肥力分级标准处于Ⅲ级中等水平。通过多元线性回归分析揭示, SOM 对综合肥力的相对重要性达 23.48%,高于其他指标,凸显有机质积累是改良滨海盐碱耕地的基础环节。建议优先通过有机物料还田、增施腐植酸等措施定向提升土壤有机质库容,同步优化氮磷养分管理以协同改善土壤肥力。

## 参考文献:

- [1] Wang G Z, Ni G, Feng G, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 216–228.

- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.
- [3] 孙盛楠, 严学兵, 尹飞虎. 我国沿海滩涂盐碱地改良与综合利用现状与展望[J]. 中国草地学报, 2024, 46(2): 1–13.
- [4] 谭琦元, 刘礼博, 刘蕾, 等. 滨海轻度盐碱苜蓿种植地土壤微量元素空间变化特征及其影响因子分析[J]. 草地学报, 2024, 32(9): 2777–2783.
- [5] 郭凯, 封晓辉, 伍靖伟, 等. 盐碱地肥沃耕层构建水肥盐综合调控机理与技术研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 29–38.
- [6] 姜彬, 尹涵, 李春雨, 等. 黄河支流陕西段渭河流域沿岸农业土壤肥力综合评价[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 387–397.
- [7] Li F P, Liu W, Lu Z B, et al. A multi-criteria evaluation system for arable land resource assessment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2): 79.
- [8] 乔俊, 任惠雯, 费鹏, 等. 山西河津黄河盐碱滩土壤肥力评价[J]. 北方园艺, 2021(16): 102–107.
- [9] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843–1848.
- [10] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 甘肃省武山县土壤养分特征及综合肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 347–353.
- [11] 陈方正, 任健, 刘思涵, 等. 基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1348–1359.
- [12] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2113–2125.
- [13] 张晓龙, 杨倩楠, 李祥东, 等. 基于主成分和聚类分析的赤红壤区不同土地利用方式土壤肥力综合评价[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 247–254.
- [14] 刘钦普. GIS 和 SPSS 技术支持下的许昌市耕作土壤肥力综合评价[J]. 土壤, 2002, 34(2): 94–98.
- [15] 高璐阳, 马志明, 沈彦辉, 等. 基于模糊数学法的山东省蔬菜优势产区土壤肥力综合评价[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(11): 27–33.
- [16] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 104–106, 111.
- [17] 邓星亮, 杨安富, 杨丽, 等. 海南岛典型农用地土壤综合肥力评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(7): 1497–1505.
- [18] 耿庆龙, 李娜, 赖宁, 等. 基于修正内梅罗指数法的果园土壤肥力评价[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(11): 2104–2111.
- [19] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [21] 蔺树栋. 膜下滴灌农田水盐肥分布特征及对棉花生长的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [22] 秦明周, 赵杰. 城乡结合部土壤质量变化特点与可持续性利用对策——以开封市为例[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 545–554.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [24] 周佳慧, 张昆, 谢志坚, 等. 稻秆炭还田对红壤双季稻田土壤碳氮磷钾生态化学计量学特征及其综合肥力的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(5): 968–975.
- [25] 于全波, 仲启铖, 李谔汐, 等. 上海外环线典型绿地土壤质量综合评价[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1077–1083.
- [26] 邵敏, 黄安东, 李德成, 等. 基于 GIS 的江淮丘陵地区典型县域土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 16–24.
- [27] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 582–593.
- [28] 潘昱伶, 璩向宁, 李琴, 等. 黄河宁夏段典型滩涂湿地土壤理化因子空间分布特征及其对微地形的响应[J]. 生态环境学报, 2023, 32(4): 668–677.
- [29] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 56–65.
- [30] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1404–1412.
- [31] 马献发, 周连仁, 陈然. 快速修复苏打草甸碱土植被对土壤盐分和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 761–763.
- [32] de la Paix M J, Lanhai L, Xi C, et al. Physicochemical properties of saline soils and aeolian dust[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 539–547.
- [33] 杨林生, 张宇亭, 黄兴成, 等. 长期施用含氮化肥对稻–麦轮作体系土壤生物肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(4): 686–694.
- [34] 李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1173–1182.
- [35] 马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用[J]. 土壤, 2020, 52(1): 33–39.
- [36] 高宏哲, 吴景贵, 李建明, 等. 不同有机培肥措施对盐碱土水稳性团聚体组成及特征的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2024, 46(5): 878–885.
- [37] 姜雪, 郭丽琢, 牛济军, 等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1086–1098.