

河北省滨海盐碱地典型地块土壤肥力特征及综合评价^①

付宇航^{1,2}, 付同刚^{1*}, 刘金铜¹, 刘一繁³, 高会¹, 王丰¹, 尚白军¹, 陈天明^{1,2}, 陈惠泽^{1,2}

(1 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室, 石家庄 050022; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 河北省张家口水文勘测研究中心, 河北张家口 075000)

摘要: 作物生长受土壤综合肥力的影响, 而在滨海盐碱地区, 受盐分含量高且易反复的影响, 土壤综合肥力特征仍不明确。本研究以河北省沧州市黄骅市典型滨海盐碱地为研究对象, 采集 0~20 cm 土壤样品 143 个, 测定土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH 和电导率 6 项指标, 采用模糊综合评价法, 对滨海盐碱地土壤综合肥力特征进行了评价。结果表明: 研究区 pH 均值为 8.11, 土壤以碱性土为主, 变异系数为 2.59%, 变异程度弱; 土壤电导率均值为 367.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 处于二级水平; 土壤有机质、全氮和有效磷含量均值分别为 22.12 g/kg、1.34 g/kg、18.86 mg/kg, 均处于三级水平; 速效钾含量均值为 287.17 mg/kg, 处于一级水平, 且这 5 项指标均为中等程度变异。研究区土壤综合肥力指数 (IFI) 平均值为 0.562, 整体处于 III 级肥力水平 ($0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$), 表明研究区土壤肥力普遍较低。其中, 全氮、有机质和有效磷对 IFI 的权重较高, 分别为 0.292 0、0.240 4 和 0.146 2, 且其间在 $P < 0.01$ 的水平下相关性显著, 说明全氮、有机质和有效磷是影响土壤肥力的关键指标; pH、速效钾和电导率对 IFI 的权重较低, 分别为 0.118 2、0.102 9 和 0.100 4, 说明这三者对土壤肥力的影响较小。综上, 针对河北省滨海盐碱地的土壤综合肥力特征, 有机无机配施 (氮肥和有机肥)、控盐排碱是改良的重要策略。

关键词: 土壤盐渍化; 养分状况; 综合肥力指数; 模糊综合评价法; 河北省

中图分类号: S158.2 **文献标志码:** A

Soil Fertility Characteristics and Comprehensive Evaluation of Typical Coastal Saline-alkali Land of Hebei Province

FU Yuhang^{1,2}, FU Tonggang^{1*}, LIU Jintong¹, LIU Yifan³, GAO Hui¹, WANG Feng¹, SHANG Baijun¹, CHEN Tianming^{1,2}, CHEN Huize^{1,2}

(1 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Hebei Provincial Zhangjiakou Hydrology Survey and Research Center, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: Crop growth is influenced by overall soil fertility. In coastal saline-alkali areas, however, the characteristics of overall soil fertility remain unclear due to high and fluctuating salt content. To address this, this study focused on typical coastal saline-alkali land in Huanghua City, Cangzhou, Hebei Province. A total of 143 topsoil samples (0–20 cm depth) were collected and analyzed for six key indicators: soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), pH, and electrical conductivity (EC). The fuzzy comprehensive evaluation method was employed to assess overall soil fertility. The results showed an average soil pH of 8.11, indicating alkalinity, with a low variation (coefficient of variation=2.59%). The average EC was 367.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, corresponding to the second-level standard. The mean contents of SOM, TN, and AP were 22.12 g/kg, 1.34 g/kg, and 18.86 mg/kg, respectively, all meeting the third-level standard. The mean AK content was 287.17 mg/kg, reaching the first-level standard. All five indicators exhibited a moderate degree of variation. The average soil integrated fertility index (IFI) was 0.562, placing it within the third fertility level ($0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$), which indicates generally low soil fertility in the study area. TN, SOM, and AP showed higher weights on the IFI (0.292 0, 0.240 4, and 0.146 2, respectively) and were significantly correlated at the $P < 0.01$ level, identifying them as key factors affecting soil fertility. In contrast, pH, AK,

①基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2020102)和河北省三三三人才工程项目(C20231028)资助。

* 通信作者(tgfu@sjziam.ac.cn)

作者简介: 付宇航(1999—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地土壤研究。E-mail: fuyuhang23@mailsucas.ac.cn

and EC had lower weights (0.118 2, 0.102 9, and 0.100 4, respectively), suggesting their relatively minor influence. In conclusion, to improve the overall fertility of coastal saline-alkali soils in Hebei Province, key strategies should include the combined application of organic and inorganic (especially nitrogen) fertilizers, along with measures for salt-alkali control and drainage.

Key words: Soil salinization; Nutrient status; Integrated Fertility Index; Fuzzy comprehensive evaluation method; Hebei Province

滨海盐碱地是我国沿海地区重要的后备耕地资源,其盐渍化与肥力低下的双重特性严重制约农业生产^[1]。我国滨海盐碱地面积约 $7.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 主要分布于环渤海、长三角及珠三角等区域^[2]。随着气候变化和人口增长,耕地资源日益紧张,滨海盐碱地土壤肥力的综合研究已成为研究热点^[3]。已有研究虽然在盐碱地降盐培肥等方面取得了较多的理论和技术成果^[4],但基于土壤综合肥力评价,针对土壤肥力限制性因素开展靶向改良的研究仍较为不足,限制了土壤综合肥力的提升。

土壤肥力综合评价是盐碱地改良与农业可持续利用的重要依据。对盐碱地土壤肥力的评价,现有研究多聚焦于单一养分指标分析,虽能反映特定肥力特征,但忽视了盐碱环境中多指标的协同效应,导致评价结果片面,难以全面反映土壤质量的综合特征^[5]。此外,传统评价方法中指标权重分配的主观性较强,经常依赖专家经验,偏差显著^[6]。因此,构建一套科学且系统的土壤肥力综合评价体系,是实现滨海盐碱地农业可持续发展的重要条件。在长期研究过程中,评价方法经历了从主观赋权到客观统计的显著演变。随着主成分分析法、层次分析法等综合评价方法的逐渐兴起,土壤综合肥力评价得到了进一步改进。吴玉红等^[7]通过主成分分析法,利用非线性隶属度函数实现评价指标量纲归一化,对单项肥力指标进行评价,直观反映了单因素肥力指标对土壤肥力的影响;周旭等^[8]用改进后的层次分析法对贵州省普安县耕地土壤肥力进行可视化评价,为区域土壤质量量化综合评价提供了新思路。然而,主成分分析法依赖数据分布假设^[9],层次分析法权重分配主观性强^[10],在精准评估盐碱地土壤综合肥力中均存在一定缺陷。

随着模糊数学理论在土壤科学中的广泛应用,模糊综合评价法逐渐成为当前主流的评价手段。该方法以模糊数学为基础,通过隶属度函数量化指标的非线性响应,有效解决了传统方法在指标选取单一等方面的局限性,在盐碱地土壤肥力评价中显著提升了对阈值效应的解析能力,避免了专家打分的主观偏差^[11-12]。在模糊综合评价框架中,权重的确定尤为关键。传统权重分配多采用专家打分法,其主观性限制了评价的

客观度。为克服这一缺点,客观赋权法逐渐兴起,其中 Pearson 相关系数法应用最为广泛。Pearson 相关系数法通过计算各指标间的统计相关性,将与其他指标协同变化程度高的因子赋予更高权重。该方法避免了层次分析法依赖专家打分的主观性,强调了指标间协同效应对综合肥力的贡献,但未考虑指标间的冲突性。在滨海盐碱地土壤肥力这种受多因子非线性交互影响的复杂系统中,强调指标间客观存在的协同或拮抗关系对综合肥力的贡献,符合其内在机理。然而,当评价指标间存在显著自相关性时,该方法会高估共性因子的权重,同时弱化独立作用指标的贡献^[13-14]。因此,在后续研究中应考虑将多种方法进行对比,选出对土壤肥力评价的最优方法。

研究表明,盐碱地土壤综合肥力受土壤盐分、养分、pH 等多个指标的综合影响^[15]。在指标体系选择中,全氮作为土壤碳氮循环的核心,直接影响微生物活性与养分矿化,而有机质含量是土壤肥力的主要限制性因素^[16];有效磷与速效钾则反映植物可直接利用的养分水平,碱性条件下有效磷易被固定^[17],而速效钾受钠离子竞争抑制^[18];pH 影响土壤肥力和作物生长发育^[19],电导率表征盐分累积程度,二者共同构成盐渍化程度评价的基础^[20]。可见,土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH 和电导率 6 项指标,是反映土壤综合肥力特征、明确土壤肥力等级的核心限制性因素。

河北省滨海盐碱地主要分布于环渤海地区,是典型的盐渍化土壤和潜在的农业资源^[21]。该区域由于长期受海水倒灌、地下水位高及蒸发强烈等因素影响,土壤盐渍化问题突出,地下水矿化度高^[22],地上植被类型单一,土壤贫瘠。土壤以滨海盐碱土为主,土壤盐分呈明显的季节性变化特征,即春、秋季返盐,夏季淋盐,冬季盐分相对稳定^[23]。土地利用以小麦、玉米轮作为主,土壤盐渍化严重制约农业生产,导致土地利用率和产出效益较低^[24],区域粮食安全与生态修复面临挑战。目前,尽管已有研究提出了多种土壤肥力综合评价体系,但对于土壤结构差、盐分易反复的河北省滨海盐碱地的研究仍显不足,迫切需要构建针对性的评价指标体系。

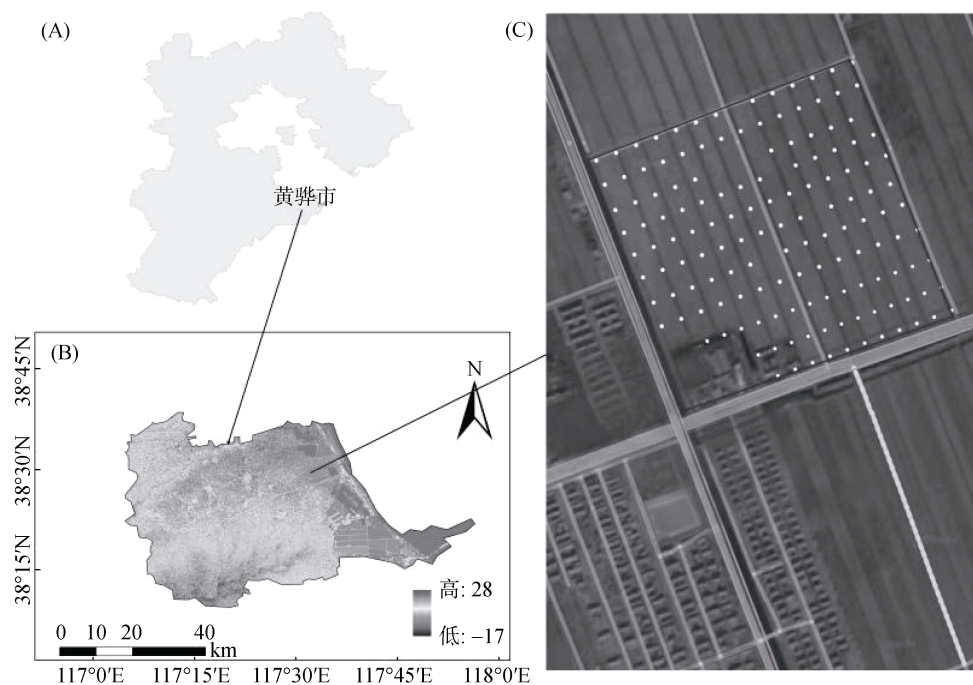
基于以上,本研究以河北省黄骅市典型滨海盐碱地为对象,利用模糊综合评价法计算土壤综合肥力指数,分析土壤综合肥力特征的影响因素,为河北滨海盐碱地综合利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省沧州市黄骅市南大港产业园区(38°09'N~38°39'N, 117°05'E~117°49'E, 图 1)。黄骅市属暖温带大陆性季风气候,年均气温 12.5℃,年均降水量为 581 mm,降水季节分配极不均匀,雨季集中在 7—9 月,约占总降水量的 70%,年均蒸发量高达 1 908 mm,降水与蒸发呈现严重失衡状态。较大的水热差值直接驱动了强烈的盐分表聚过程,形

成地表盐结皮或盐斑。季节性干湿交替的气候特点还导致黄骅市土壤盐分运移呈现明显周年循环,雨季短暂的淋盐作用使部分盐分下移至土壤底层,但随后长达 8 个月的干旱期又使深层盐分随蒸发重新向地表富集^[24-25]。区域内土壤以滨海盐碱土为主,质地以壤土为主,黏壤土和砂土次之,剖面构型具有典型的“上黏下砂”层次结构,深刻影响着区域水盐运移。黄骅市地下浅层咸水资源丰富,地下咸水矿化度一般为 1~5 g/L,地下水埋深较浅,盐渍化程度高^[22-23]。而研究区内土壤结构普遍板结严重,有机质含量多低于 10 g/kg,导致土壤通透性差、持水能力弱,进一步加剧了盐分表聚效应^[26]。研究区于 2022 年 6 月开始耕作,土地利用以夏玉米—冬小麦轮作为主,在未开垦之前以荒地为主,排水较差,出现盐碱斑块,盐碱地分布广泛。



(A: 黄骅市在河北省位置图; B: 黄骅市高程图; C: 采样点位置图)

图 1 研究区域和采样点位置

Fig. 1 Locations of study area and sampling sites

1.2 土壤样品采集及相关指标测定

研究区总面积 1 km²。2024 年 6 月,按网格法(50 m×50 m)布设 141 个采样点,采集 0~20 cm 表层土壤,自然风干后过 2 mm 筛备用。分别测定土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH、电导率 6 个指标,测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[27]。其中,有机质利用重铬酸钾氧化—外加热法测定,全氮利用凯氏定氮法测定,有效磷利用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾利用乙酸铵浸提—火焰光度法测定,pH 利用电极法测定,电导率利用电极法

测定。

1.3 土壤肥力综合评价

模糊综合评价法是基于模糊数学理论构建的一种量化分析方法,其核心在于运用隶属度函数和权重分配将定性评价转化为定量评估^[12]。评价过程包括:首先,需科学筛选影响因子并建立多级评价指标体系;其次,通过隶属函数模型计算各指标隶属度值,隶属度值越接近 1,表征其对土壤肥力的贡献度越高;最后,结合 Pearson 相关性分析确定权重系数,运用模糊数学的加权乘法运算得出综合评价指数^[20]。

1.3.1 隶属度函数 选取土壤有机质、有效磷、全氮、速效钾、pH 和电导率共 6 个指标构建评价指标体系。其中,有机质、有效磷、速效钾、全氮均属于 S 型隶属函数, pH 属于抛物线型隶属函数, 电导率属于戒下型隶属函数^[28-31]。

S 型隶属函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & (x \geq x_2) \\ \frac{0.9(x-x_1)}{(x_2-x_1)} + 0.1 & (x_1 < x < x_2) \\ 0.1 & (x \leq x_1) \end{cases} \quad (1)$$

抛物线型隶属函数:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.9(x-x_3)}{(x_4-x_3)} & (x_3 < x < x_4) \\ 1.0 & (x_2 \leq x < x_3) \\ \frac{0.9(x-x_1)}{(x_2-x_1)} + 0.1 & (x_1 < x < x_2) \\ 0.1 & (x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4) \end{cases} \quad (2)$$

戒下型隶属函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x \geq x_2) \\ \frac{0.9(x-x_1)}{(x_2-x_1)} + 0.1 & (x_1 < x < x_2) \\ 1.0 & (x \leq x_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为该隶属函数中评价指标在曲线中的转折点。本研究中,转折点取值基于前期相关文献^[15-16, 28-31], 结合本区域特征并参考全国第二次土壤普查养分分级标准^[32], 取值结果如表 1 所示。

表 1 隶属函数转折点取值

Table 1 Turning points for membership functions of evaluation indicators

转折点	有机质 (g/kg)	pH	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
x_1	10	5.5	120	0.75	10	100
x_2	40	6.5	800	2.00	20	200
x_3		7.5				
x_4		8.5				

1.3.2 权重确定 权重反映某一因子在总体评价中的相对重要性。土壤肥力综合评价的关键就在于确定土壤各肥力指标的权重系数。在权重确定环节,一般采用相关系数法计算各肥力指标间的关联程度,通过计算单项指标与其他指标相关系数绝对值的均值,再将该均值与所有指标相关系数总均值的比值作为该指标的权重系数^[11]。此方法强调权重系数反映各因子在评价体系中的相对重要性,其科学性与准确性直接

影响土壤肥力综合评价的可靠性。然而,相关系数法存在其固有局限性。本研究选择相关系数法确定评价指标权重主要基于以下考虑:①本研究首要目标是建立一个客观量化的评价体系,减少人为主观判断对结果的影响。相关系数法直接依据数据本身揭示的关系进行赋权,符合这一原则。②在盐碱地环境中,土壤肥力往往是多个指标,如盐分、pH、有机质、养分等协同作用或相互制约的结果。相关系数法赋权较高的指标,通常是与其他指标协同变化程度高的因子,这些因子往往在驱动系统整体肥力状态方面扮演着更核心的角色。本研究基于 141 个高密度采样点的实测数据,样本量较大,在一定程度上增强了统计关系的稳健性,有助于消减相关系数法潜在自相关问题带来的偏差。

1.3.3 土壤综合肥力指数计算 土壤综合肥力指数(Integrated fertility index, IFI)是精确有效地评估土壤质量状况和退化程度的重要指标。本研究通过模糊数学中的加权乘法原理计算 IFI, 计算公式为:

$$\text{IFI} = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (4)$$

式中: n 为指标数量; w_i 和 f_i 分别为第 i 个评价因子的权重系数和隶属函数值。本研究根据 IFI 值划分土壤肥力综合状况(表 2)^[31]。

表 2 土壤肥力综合评价标准

Table 2 Comprehensive evaluation criteria for soil fertility

土壤肥力等级	I 级	II 级	III 级	IV 级
IFI	$\text{IFI} \geq 0.8$	$0.6 \leq \text{IFI} < 0.8$	$0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$	$\text{IFI} < 0.4$

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 整理数据,利用 SPSS 26.0 进行土壤肥力指标的描述性统计分析、Pearson 相关分析,运用 Origin 2018 作图。利用 ArcGIS10.8 绘制空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标的描述性统计

各采样点土壤 pH 范围为 7.04~8.53, 平均值为 8.11(表 3), 变异系数为 2.59%, 属于弱变异, 表明研究区土壤主要为碱性土壤, 且土壤酸碱度的稳定性相对较高; 土壤有机质含量在 5.00~35.00 g/kg, 平均值为 22.12 g/kg, 变异系数为 25.09%, 为中等变异, 土壤有机质分布不均; 电导率范围为 60.00~852.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 均值为 367.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 变异系数为 58.12%, 属于中等变异, 进一步证实盐分累积显著且空间异质性突

出;全氮和有效磷含量范围分别为 0.58~2.84 g/kg、4.70~84.30 mg/kg, 平均值分别为 1.34 g/kg 和 18.86 mg/kg, 变异系数分别为 20.90% 和 64.85%, 均属于中等变异, 表明研究区土壤普遍存在养分匮乏的问题, 且空间分布不均匀, 这可能与局部施肥或土壤盐分差异有关; 速效钾含量范围为 138.00~485.00 mg/kg, 平均值为 287.17 mg/kg, 含量相对丰富, 变异系数为 25.13%, 为中等变异。

表 3 供试土壤主要肥力指标描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of main fertility indicator of tested soils

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
有机质(g/kg)	5.00	35.60	22.12	5.55	25.09
pH	7.04	8.53	8.11	0.21	2.59
电导率(μS/cm)	60.00	852.00	367.01	213.29	58.12
全氮(g/kg)	0.58	2.84	1.34	0.28	20.90
有效磷(mg/kg)	4.70	84.30	18.86	12.23	64.85
速效钾(mg/kg)	138.00	485.00	287.17	72.16	25.13

依据前人研究以及结合本区域特征对土壤各肥力指标进行量级划分, 分为一级至五级, 分别代表肥

力水平从高到低。由表 4 可见, 研究区土壤有机质、全氮和有效磷含量均值均处于三级水平, 速效钾含量处于一级水平, 电导率处于二级水平^[27-33]。整体上, 研究区土壤有机质、全氮和有效磷含量处于中等水平, 速效钾处于较高水平, 盐分含量一般, 但 pH 较高, 对农作物的生长有着较大的限制。

表 4 土壤肥力评价指标量级划分

Table 4 Classification of evaluation indicators for soil fertility

评价指标	一级	二级	三级	四级	五级
有机质(g/kg)	>40	(30, 40]	(20, 30]	[10, 20]	<10
有效磷(mg/kg)	>40	(20, 40]	(10, 20]	[5, 10]	<5
速效钾(mg/kg)	>200	(150, 200]	(100, 150]	[50, 100]	<50
电导率(μS/cm)	[0, 300]	(300, 600]	(600, 900]	(900, 1200]	>1200
全氮(g/kg)	>2	(1.5, 2]	(1, 1.5]	[0.75, 1]	<0.75

其中, 电导率在 0~300 μS/cm 的样点占比最高, 达 45.5%(图 2), 表明研究区盐渍化程度较轻; 而有机质和全氮含量分布多集中在 20~30 g/kg 和 1.0~1.5 g/kg, 分别占总样点的 53.8% 和 61.5%, 表明氮素和有机质普遍不足, 养分匮乏。

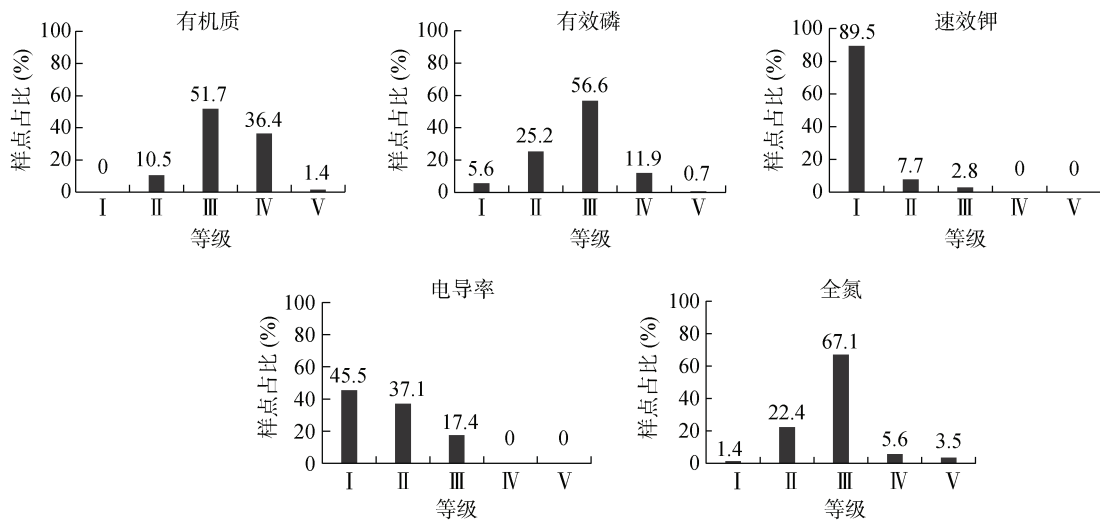


图 2 研究区各等级土壤肥力指标分布频率

Fig. 2 Frequency distributions of different grades of soil fertility indicators in study area

2.2 土壤肥力指标间的相关性

Pearson 相关性分析(表 5)表明, 土壤全氮与有机质呈显著正相关, r 为 0.497, $P < 0.01$, 表明两者在土壤肥力中具有协同作用, 这可能源于有机质分解过程中会释放氮素。而土壤有效磷与 pH 呈显著负相关, r 为 -0.175 , $P < 0.01$, 表明盐碱化抑制磷有效性, 这与碱性条件下磷酸盐易被固定为难溶性化合物的机制一致。

表 5 土壤肥力评价指标间的相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of soil fertility evaluation indicators

	有机质	pH	电导率	全氮	有效磷
pH	0.035				
电导率	-0.031	0.028			
全氮	0.497**	0.048	-0.108		
有效磷	0.040	-0.175**	-0.016	0.114	
速效钾	0.058	0.039	-0.093	0.036	0.057

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)显著相关; 下同。

2.3 土壤综合肥力指数

2.3.1 隶属函数 通过隶属函数将指标实测值转化为 0~1 的标准化值,越接近 1,表示该指标值对肥力越有利。速效钾、有效磷和全氮的隶属函数平均值较高(表 6),表明其对土壤肥力的影响较大;有机质、pH 和电导率的隶属度函数平均值较低,说明这三者限制了当地土壤肥力提升。

表 6 研究区土壤肥力评价指标隶属度
Table 6 Membership degrees of evaluation indicators of soil fertility in study area

隶属函数	有机质	pH	电导率	全氮	有效磷	速效钾
最小值	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.442
最大值	0.868	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均值	0.465	0.451	0.506	0.525	0.637	0.967
标准差	0.162	0.166	0.298	0.179	0.348	0.107
变异系数(%)	34.8	36.8	58.9	34.1	54.6	11.1

2.3.2 权重系数 权重反映指标在综合评价体系中的相对重要性,由各指标间的相关性决定。单项指标可通过与其他指标的协同作用影响综合肥力。权重越高,表明该指标对 IFI 的整体影响越大。通过计算得出,全氮、有机质和有效磷对 IFI 的权重较高,分别为 0.292 0、0.240 4 和 0.146 2,表明这三者对土壤肥力综合水平影响最大,是决定土壤肥力的关键因素;pH、速效钾和电导率对 IFI 的权重较低,分别为 0.118 2、0.102 9 和 0.100 4,说明这三者对土壤肥力的贡献较低(表 7)。

表 7 研究区土壤肥力评价指标权重
Table 7 Weights of evaluation indicators of soil fertility in study area

肥力指标	有机质	pH	电导率	全氮	有效磷	速效钾
相关系数平均值	0.132 2	0.065 0	0.055 2	0.160 6	0.080 4	0.056 6
权重系数	0.240 4	0.118 2	0.100 4	0.292 0	0.146 2	0.102 9

2.3.3 土壤综合肥力指数 研究区 IFI 均值为 0.562,变幅为 0.306~0.811,标准差为 0.109,变异系数为 19.4%,53.8% 的样点处于 III 级肥力水平($0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$),37.8% 的样点处于 II 级,7.0% 的样点处于 IV 级,仅 1.4% 的样点达到 I 级。研究区土壤养分状况较差,土壤肥力普遍较低(表 8)。

2.4 评价指标对土壤综合肥力指数的影响

相关分析表明,IFI 与有机质、全氮和有效磷呈极显著正相关(表 9),表明研究区土壤中有有机质、全氮和有效磷含量与土壤肥力紧密相关,并对土壤肥力有显著促进作用。

表 8 滨海盐碱地不同等级土壤综合肥力指数
Table 8 Soil integrated fertility indexes under different grades of coastal saline-alkali lands

土壤等级	平均值	标准差	变异系数(%)	范围	样点数	样点比例(%)
I	0.808	0.004	0.5	0.805~0.811	2	1.4
II	0.662	0.048	7.3	0.601~0.774	54	37.8
III	0.512	0.058	11.3	0.401~0.595	77	53.8
IV	0.353	0.031	8.8	0.306~0.396	10	7.0
总体	0.562	0.109	19.4	0.306~0.811	143	-

表 9 土壤综合肥力指数与各评价指标的相关性
Table 9 Correlation coefficients of integrated soil fertility index and evaluation indexes

	有机质	pH	电导率	全氮	有效磷	速效钾
IFI	0.678**	-0.113	0.100	0.684**	0.412**	0.089

速效钾与其他指标相关性均不显著(表 5),但其隶属度均值高达 0.967(表 6),说明尽管速效钾含量较高,均值为 287.17 mg/kg,但其对土壤综合肥力的贡献受限于较低的权重分配,表明高钾含量未有效转化为肥力优势。pH 与 IFI 呈负相关,表明碱性抑制土壤肥力。

全氮、有机质和有效磷为 IFI 的核心指标,权重分别为 0.292 0、0.240 4 和 0.146 2,三者合计贡献率达 67.8%(表 7);相关分析进一步表明,全氮和有机质与 IFI 的相关系数分别为 0.684 和 0.678, $P < 0.01$,说明二者是影响土壤综合肥力的关键。而电导率虽与 IFI 相关,但不显著,因其权重较低,影响有限。

3 讨论

3.1 土壤综合肥力指数各指标之间的相互影响

全氮与有机质呈显著正相关,这与有机质作为氮素的主要来源密切相关。有机质通过微生物分解矿化释放氮素,进而提升土壤氮的有效性^[16]。研究区有机质平均含量为 22.12 g/kg,指标量级划分处于三级,属于中等水平。因此,未来可通过施用有机肥、秸秆还田等技术手段提升土壤有机质含量,这不仅直接改善土壤结构,还可通过增强氮素供应间接提升土壤肥力。

有效磷与 pH 呈显著负相关,这与碱性条件下磷酸盐与钙、镁等离子结合形成难溶性化合物的机制一致^[15]。研究区有效磷均值仅为 18.86 mg/kg(三级水平),表明研究区磷素匮乏。建议通过施用酸性改良剂调节磷的释放,如硫磺或磷石膏调节 pH 至中性范围,可有效释放被固定的磷素^[34-35]。

3.2 土壤综合肥力指数各指标对 IFI 的影响

IFI 与有机质、全氮和有效磷呈极显著正相关(表

9), 表明这 3 个指标对土壤肥力具有显著的促进作用。全氮、有机质和有效磷为 IFI 的核心指标, 权重分别为 0.292 0、0.240 4 和 0.146 2, 三者合计贡献率达 67.8%, 而全氮和有机质对 IFI 的相关系数分别为 0.684 和 0.678, $P < 0.01$, 说明全氮和有机质对土壤综合肥力具有重要贡献。pH 与 IFI 呈负相关, 表明碱性抑制土壤肥力。

研究区土壤速效钾均值 287.17 mg/kg, 达一级水平, 但其权重仅 0.102 9, 隶属度却高达 0.967。表明高钾含量未有效转化为肥力优势, 可能因为盐碱地中钠离子对钾离子的竞争性抑制, 钠离子占据土壤胶体表面, 降低钾的有效性, 导致植物可利用性降低^[36]。因此, 尽管速效钾总量丰富, 但其生物有效性受限。未来改良中需结合排盐措施降低钠离子浓度, 或通过施用腐殖酸增强钾的释放^[1]。研究区电导率变异系数达 58.12%, 表明盐分分布不均匀, 需分区制定控盐策略。

研究区土壤电导率均值为 367.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 处于二级水平, 虽与 IFI 相关, 但不显著, 对 IFI 的权重仅为 0.100 4, 表明盐分对肥力的影响有限。这可能因盐分对肥力的影响具有阈值效应, 当电导率低于临界值时, 如 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 盐分对养分的拮抗作用较弱; 而超过该阈值后, 盐害效应迅速增强^[15]。但 17.4% 的样点电导率超过 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 最高达 852 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (图 2)。本研究采用的戒上型隶属函数在电导率 $> 800 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时统一赋值为 0.1, 为最低肥力隶属度, 忽略了盐分胁迫的非线性增长特性。当电导率超过临界阈值时, 盐分对养分离子的拮抗作用显著增强, 导致作物遭受渗透胁迫与离子毒害。

3.3 耕作对土壤肥力变化的影响

研究区 IFI 整体处于 III 级水平($0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$), 表明土壤肥力仍是当前滨海盐碱地土壤进行农业生产的主要限制因素。然而, 连续多年合理耕作可通过物理、化学和生物的协同作用显著改善土壤质量。研究区有机质平均含量为 22.12 g/kg, 处于中等水平。通过秸秆还田结合腐殖酸或生物炭的施用, 不仅可以直接外源补充有机碳, 还可以通过改善土壤结构、缓解盐分对微生物活性的抑制, 促进有机质的形成与稳定, 从而提升土壤肥力^[37]。

研究区自 2022 年开始规模化耕作, 主要采用小麦-玉米轮作模式。长期单一耕作模式可能对土壤肥力具有双重影响。一方面, 玉米作为高氮需求作物, 连续种植会导致氮素过度消耗, 进一步限制微生物活性与养分矿化过程; 另一方面, 连续的秸秆还田结合

有机肥施用是改善盐碱地结构、提升土壤肥力水平的有效途径。研究区玉米秸秆还田可显著改善土壤养分状况, 但区域内秸秆还田措施尚未显著提升有机质水平至理想状态。耕作过程中的水肥调控直接影响了盐分动态。在未开垦阶段, 由于排水不畅, 地表极易形成盐碱斑块。经过合理开垦与排灌系统建设, 土壤盐分呈现出下降趋势, 这在 IFI 指标权重的分配中得到了体现。然而, 目前有机质水平仍处于三级, 距离理想的一级土壤仍有巨大差距, 说明土壤改良是一个长期的过程。

3.4 研究不足与建议

本研究通过模糊综合评价法明确了河北省黄骅市滨海盐碱地土壤综合肥力的核心限制因素, 为靶向改良策略的制定提供了科学依据。在未来研究中, 可进一步整合微生物活性、酶活性等生物指标, 构建多维度的评价体系, 以更全面地解析土壤肥力动态; 可考虑结合主成分分析(PCA)或结构方程模型(SEM)等方法来进一步解析因子间的直接和间接效应, 以完善权重分配策略; 可从长期定位试验、多维度评价体系、跨区域对比方向深入, 探索盐分季节性变化对肥力的动态影响, 提炼更具普适性的改良框架。本研究虽成功构建了基于模糊综合评价的 IFI 指标并识别了核心肥力限制因子, 但未能直接关联具体的小麦产量数据以量化 IFI 与最终产量的关系。这主要源于研究区耕作历史相对较短, 采样点较多, 获取产量数据困难, 种植模式统一且初期产量受盐碱障碍影响显著, 难以获取稳定、有代表性的产量梯度数据用于精确建模。此外, 受限于单次采样数据和研究区域集中性, 土壤肥力对长期耕作措施和气候波动的响应机制仍需通过长期定位试验进一步验证。

4 结论

研究区 IFI 均值为 0.562, 58.9% 的样点处于 III 级肥力水平($0.4 \leq \text{IFI} < 0.6$), 表明土壤综合肥力普遍不高。土壤全氮、有机质和有效磷对 IFI 的权重合计达 67.8%, 分别为 0.292 0、0.240 4、0.146 2, 且与 IFI 呈极显著正相关, 是驱动土壤肥力的关键因子, 这进一步证实养分匮乏是限制该区域土壤肥力的主导因素。土壤电导率均值为 367.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 为轻度盐渍化, 其权重为 0.100 4, 与 IFI 相关但不显著($r = 0.100$, $P > 0.05$), 表明当前研究区整体盐分水平尚未显著抑制肥力; 但其变异系数为 58.12%, 揭示盐分空间呈现异质性, 需警惕部分地块盐分的胁迫效应。土壤速效钾含量均值为 287.17 mg/kg, 达一级水平, 隶属度

高达 0.967, 但其权重较低, 仅 0.102 9, 主要是因为盐碱地中钠离子竞争性抑制钾的生物有效性, 导致高钾含量未能有效转化为肥力优势。

参考文献:

- [1] 张贵芹, 王洪章, 郭新送, 等. 有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(9): 2323–2334.
- [2] 刘敬美, 李新平, 李文斌, 等. 陕西省渭南市卤阳湖盐碱地土壤肥力综合评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 254–257, 262.
- [3] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 219–224.
- [4] 孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231–1247.
- [5] 代迅. 基于模糊数学法的西藏丁青县土壤肥力综合评价[J]. 中国农学通报, 2024, 40(19): 70–75.
- [6] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202–205.
- [7] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173–180.
- [8] 周旭, 安裕伦, 许武成, 等. 基于 GIS 和改进层次分析法的耕地土壤肥力模糊评价——以贵州省普安县为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 51–55.
- [9] 李艳双, 曾珍香, 张闯, 等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(1): 94–97.
- [10] 吴殿廷, 李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 264–268.
- [11] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65–70.
- [12] 杨振铎, 周其文, 王伟, 等. 基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(12): 2780–2786.
- [13] 褚旭, 李雨, 杜坚, 等. 应用综合赋权法评价植烟土壤肥力[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(4): 42–49.
- [14] 王雨, 王桂良, 沈婉仪, 等. 黄淮平原地区典型县域耕地土壤肥力评价[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(8): 1434–1445.
- [15] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362–369.
- [16] 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 232–238.
- [17] 周佳逸, 宁琪, 李祥, 等. 不同有机物料施用对滨海盐渍土降盐培肥及大豆促生抗逆的影响[J]. 土壤, 2025, 57(3): 612–620.
- [18] Chen Y D, Wang H Y, Zhou J M, et al. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 564–576.
- [19] 周思怡, 李晓佳, 张恂, 等. 不同物料对海滨沙性盐碱地改良效果研究[J]. 土壤, 2023, 55(2): 356–362.
- [20] 姜展博, 宁松瑞, 王全九. 脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(3): 699–713.
- [21] 李彦鑫, 徐丽, 齐菲, 等. 滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1110–1120.
- [22] 高会, 赵亮, 刘斌, 等. 河北滨海盐碱地浅层轻度咸水资源冬小麦灌溉安全利用研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1102–1109.
- [23] 臧亮, 张慧, 赵红安, 等. 黄骅市土壤含盐量空间变异特征和影响因素分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 545–551.
- [24] 张秀梅, 郭凯, 谢志霞, 等. 冬季咸水结冰灌溉下滨海重盐碱地土壤水盐动态及对棉花出苗和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1310–1314.
- [25] 胥伟华, 王建林, 刘小京, 等. 建设“滨海草带”的科技缘由、内容与对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 238–245.
- [26] 冯伟, 刘忠宽, 刘振宇, 等. 河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 56–60.
- [27] 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, 2000.
- [28] 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.
- [29] 任艳芳, 何俊瑜, 张艳超, 等. 贵州省开阳茶园土壤养分状况与肥力质量评价[J]. 土壤, 2016, 48(4): 668–674.
- [30] 王新修, 苟剑渝, 刘京, 等. 遵义市植烟土壤肥力综合评价及空间分布[J]. 中国土壤与肥料, 2024(2): 1–9.
- [31] 周龙, 彭晓云, 汤利, 等. 普洱市茶园土壤 pH、有机质和中微量养分分析及肥力综合评价[J]. 南方农业学报, 2024, 55(6): 1628–1638.
- [32] 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.
- [33] 亓丽, 潘继花, 郇志飞, 等. 基于熵权的模糊评价法对日照市茶园土壤养分分析与质量评价[J]. 中国农学通报, 2019, 35(6): 54–61.
- [34] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901–913.
- [35] 张乐, 徐平平, 李素艳, 等. 有机-无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 92–99.
- [36] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤, 1999, 31(5): 244–254.
- [37] 王士超, 方栋, 李晓林, 等. 河北滨海盐碱地苜蓿营养品质对秋眠等级和茬次的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(10): 1630–1637.

(责任编辑: 于 飞)