杨岩,刘兆辉,刘玉敏,等.黄河三角洲滨海盐碱地改良效果评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):9-17.
Yang Y, Liu Z, Liu Y M, et al. Evaluation of the improvement effects on coastal saline-alkali lands in the Yellow River Delta [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):9-17.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202505037

黄河三角洲滨海盐碱地改良效果评价

杨岩[1],刘兆辉[1,2],刘玉敏[1],赵环宇[1],石璟[1],江丽华[3],郭立亮[4],徐钰[1,2*]

(1.养分资源高效利用全国重点实验室/农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室/山东省农业科学院,山东 济南 250100;
2.国家盐碱地综合利用技术创新中心,山东 东营,257345;3.山东农业工程学院 资源与环境工程学院,山东 济南 250100;
4.济南昱泰资源利用科技开发有限公司,山东 济南 251614)

摘　要:[目的]黄河三角洲滨海盐碱地因土壤结构性差和盐分含量高等条件限制,产能相对较低,难以满足我国耕地和粮食安全的战略需求。本研究旨在通过筛选适宜的土壤改良剂,评价不同类型改良剂对滨海盐碱地改良效果,探索适合黄河三角洲滨海盐碱地综合改良的技术措施,为"藏粮于地"战略举措的实施提供技术支撑。[方法]选取黄河三角洲的中轻度盐碱化地区山东省昌邑市柳疃镇青阜社区,于2022—2024年进行小麦—玉米轮作,以优化施肥(OPT)为技术基础,与选取的硝基腐植酸、微矿粉、磷石膏和聚丙烯酰胺4种土壤改良剂进行组合应用,共设置8个处理,以常规施肥(FP)为对照,利用土壤质量指数(SQI)和主成分分析(PCA)2种方法对比分析连续2年施用改良剂后耕层土壤质量及作物产量的差异,筛选出最优组合方案。[结果]与FP相比,OPG(优化施肥+磷石膏)处理耕层土壤pH值、可溶性总盐含量、Mg^{2+}含量、Na^{+}含量和SAR值分别显著降低6.65%、39.35%、44.70%、96.30%和96.22%。OSR2(优化施肥+分次施微矿粉)仅能够显著降低耕层土壤可溶性总盐含量,但其土壤质量指数(SQI)最高,达0.67,且主成分分析综合得分最高,平均周年产量显著提高10.78%。[结论]优化施肥基础上小麦、玉米季分别底施微矿粉为本研究中综合改良效果最佳的技术措施,但其耕层土壤Na^{+}含量和SAR值较高,盐碱化的风险仍较大,后续研究可考虑与磷石膏组合使用,进一步提升改良效果。

关键词:滨海盐碱地; 土壤改良; 土壤质量指数; 主成分分析; 作物产量
中图分类号:S156.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0009-09

Evaluation of the improvement effects on coastal saline-alkali lands in the Yellow River Delta

Yang Yan[1], Liu Zhaohui[1,2], Liu Yumin[1], Zhao Huanyu[1], Shi Jing[1], Jiang Lihua[3], Guo Liliang[4], Xu Yu[1,2*]

(*1.State Key Laboratory of Nutrient Use and Management/Key Laboratory of Agro-Environment of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, 250100; 2.National Technological Innovation Center for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying, 257345; 3.School of Resources and Environmental Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100; 4.Jinan Yutai Resources Utilization Technology Development Co., Ltd., Jinan, 251614*)

Abstract:[Objective]The coastal saline-alkali land in the Yellow River Delta suffer from low productivity due to poor soil structure and high salinity, which challenges China's strategic goals for farmland preservation and food security. This study aimed to identify effective soil amendments, assess their individual and combined effects on soil improvement, and explore integrated

收稿日期:2025-05-19　　**修回日期**:2025-06-27
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900903, 2023YFD1902703);山东省重点研发计划(科技示范工程)(2022SFG0302);山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2023TSGC0130)
作者简介:杨岩(ORCID:0009-0000-1186-0282),助理研究员,博士,研究方向:高效施肥及养分循环管理,E-mail: tornado23@126.com
*通信作者:徐钰,研究员,E-mail: xuy0221@163.com

technical measures suitable for rehabilitating these coastal saline-alkali lands, thereby providing technical support for the "Storing Grain in Land" strategy. [Methods]A field experiment was conducted from 2022 to 2024 in Qingfu Community, Liutuan Town, Changyi City, Shandong Province, an area cjaracterized by mild to moderate salinity within the Yellow River Delta. Employing a wheat-maize rotation system, the experiment used optimized fertilization (OPT) as a baseline and tested it in combination with four soil amendments: nitro-humic acid, micro-mineral powder, phosphogypsum, and polyacrylamide. A total of eight treatments were established, with conventional fertilization (FP)serving as the control. After two consecutive years of amendment application, differences in topsoil quality and crop yield were analyzed using the soil quality index (SQI) and principal component analysis (PCA)to identify the optimal treatment combination. [Results]Compared to the FP treatment, the OPG treatment (optimized fertilization + phosphogypsum) significantly reduced topsoil pH, total soluble salt content, Mg^{2+} content, Na^{+} content, and Sodium Adsorption Ratio (SAR) by 6.65%, 39.35%, 44.70%, 96.30%, and 96.22%, respectively. Although the OSR2 treatment (optimized fertilization + split application of micro-mineral powder) only significantly reduced the total soluble salt content, it achieved the highest soil quality index (SQI)of 0.67 and the top comprehensive score in the principal component analysis. Furthermore, OSR2 resulted in a significantly increase by 10.78% in the average annual yield. [Conclusion]The application of mineral powder as a base fertilizer during the wheat and corn seasons, combined with optimized fertilization, proved to be the most effective comprehensive improvement measure in this study. However, the relatively high Na^{+} content and SAR value in the topsoil under this treatment indicated a persistent risk of salinization-alkalization. Future research should explore its combination with phosphogypsum to further enhance the amelioration effect.

Keywords: Coastal saline-alkali lands, Soil improvement, Soil quality index(SQI), Principal component analysis(PCA), Crop yield

土壤盐碱化会导致农作物减产、土壤结构退化和水资源利用率降低等一系列问题,进而造成严重的生态和环境风险[1-2]。据统计,全球约有10%的耕地正受到盐碱化的威胁[3],而其中约10%的盐碱地位于我国[4]。我国最主要的盐碱地类型为滨海盐碱地,总面积接近700万公顷[5],如何对其进行科学有效的改良利用,对我国粮食安全和滨海地区生态环境保护具有重要意义[6]。

大量研究表明,施用改良剂是盐碱地改良的有效措施[7],但不同改良剂对耕层土壤质量指标作用差异较大[3]。施用腐植酸等可有效降低盐碱地土壤容重,增加土壤孔隙度,促进植物生长发育[8];施用高吸水性树脂等材料可改善土壤结构,促进大颗粒土壤团聚体的形成[9-10];施用石膏类改良剂则可显著降低盐碱土pH[11],重构水盐平衡并促进土壤盐分的浸出[12];施用有机肥及微晶化矿物等可显著提高土壤有机质和养分含量[7,13]。这在一定程度上增加了不同类型改良剂效果综合评价的难度。针对这一问题,本研究通过选取化学改良剂磷石膏[14-15]、硝基腐植酸[16]和新型改良剂产品聚丙烯酰胺(PAM)[17]及利用微矿分离技术生产的土壤改良矿物质(SRM)[18]这几种常用改良剂开展为期2年的小麦-玉米轮作试验,通过利用土壤质量指数(SQI)和主成分分析(PCA)2种主流评价方法,综合对比评价不同改良剂及技术措施对黄河三角洲地区滨海盐碱地土壤质量及小麦、玉米产量的影响,旨在为盐碱地的改良利用及产能提升筛选最优技术措施。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究以黄河三角洲盐碱化地区为研究对象,山东省昌邑市柳疃镇青阜社区小麦种植区多点取样测定表层土壤可溶性总盐含量范围为1.16~2.70 g/kg[19],根据王遵亲等著的《中国盐渍土》中黄河三角洲土壤盐分分级标准,可认为是中轻度盐碱化地区。试验在青阜社区丰瑞农业科技有限公司(37°11′ N,119°21′ E)进行,选择小麦-玉米一年两熟试验田开展试验。土壤类型为盐土,耕层土壤质地为粉砂壤土,土壤pH值为8.76,有机质含量9.17 g/kg,全氮含量0.52 g/kg,有效磷含量25.25 mg/kg,有效钾含量462.50 mg/kg,可溶性总盐含量1.44 g/kg。

1.2 试验材料

小麦和玉米供试品种分别为'山农38'和'伟科931',第1年田间试验小麦播种日期为2022年11月10日,收获日期为2023年6月5日;玉米播种日期为2023年6月17日,收获日期为2023年9月26日。第2年田间试验小麦播种日期为2023年10月24日,收获日期为2024年6月5日;玉米播种日

期为2024年6月18日,收获日期为2024年9月28日。本研究所用4种改良剂中,硝基腐植酸采购自内蒙古众盛利禾腐殖酸肥业有限公司,微矿粉由滕州瑞科天启能源科技有限公司提供,磷石膏由山东鲁北化工股份有限公司提供,聚丙烯酰胺采购自河南巩义市新奇聚合物厂。

1.3　试验设计

本研究共设8个处理,每个处理设3个平行重复,共24个试验小区,每小区面积44 m^2(10 m×4.4 m),随机区组排列。在前期筛选试验基础上,设置各处理肥料及改良剂用量如下:

(1)常规施肥(FP):小麦播种前,底施复合肥(N 15%,P_2O_5 15%,K_2O 15%)750 kg/hm^2,返青期追施尿素(N 46%,下同)375 kg/hm^2;玉米种肥同播复合肥(N 30%,P_2O_5 8%,K_2O 6%)600 kg/hm^2。

(2)优化施肥(OPT):小麦播种前,底施控释肥(N 16%,P_2O_5 20%,K_2O 5%)600 kg/hm^2,返青期追施尿素375 kg/hm^2;玉米种肥同播控释肥(N 28%,P_2O_5 14%, K_2O 10%)450 kg/hm^2。

(3)优化施肥+硝基腐植酸(ONA):优化施肥基础上,小麦、玉米季分别底施硝基腐植酸750 kg/hm^2。

(4)优化施肥+微矿粉(OSR):优化施肥基础上,小麦季底施微矿粉15 t/hm^2。

(5)优化施肥+磷石膏(OPG):优化施肥基础上,小麦、玉米季分别底施磷石膏7.5 t/hm^2。

(6)优化施肥+聚丙烯酰胺(OPA):优化施肥基础上,小麦、玉米季分别底施聚丙烯酰胺1125 kg/hm^2[17]。

(7)优化施肥+分次施微矿粉(OSR2):优化施肥基础上,小麦、玉米季分别底施微矿粉7.5 t/hm^2。

(8)优化施肥+组合改良(ONS):优化施肥基础上,小麦季底施硝基腐植酸750 kg/hm^2和微矿粉15 t/hm^2,玉米季仅底施硝基腐植酸750 kg/hm^2。

1.4　样品采集与测定

1.4.1　土壤样品采集与测定

2024年玉米收获时,每个小区采用"之"字取样法采集5个样点0~20 cm土层的混合样品,鲜样测定土壤NO_3^--N和NH_4^+-N含量,剩余样品室内自然风干后分别过2 mm和0.25 mm筛,测定土壤全氮、有机质、有效磷、有效钾、可溶性总盐、水溶性阳离子含量与pH。土壤NO_3^--N和NH_4^+-N含量采用全自动间断分析仪测定;土壤pH使用玻璃电极酸度计(水土比5∶1)测定;土壤可溶性总盐含量采用烘干法测定;土壤有机质含量采用$K_2Cr_2O_7$外加热法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤速效磷含量采用钼锑抗比色法测定;土壤阳离子交换量采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定;土壤水溶性Na^+和K^+含量采用火焰光度法测定,土壤水溶性Ca^{2+}和Mg^{2+}含量采用原子吸收分光光度法测定[20]。

1.4.2　产量测定

在小麦和玉米收获期,每个小区分别随机采集3块1 m×1 m样方和2行×2 m样方的植株样品,风干后脱粒,测定籽粒种量,并以采样面积折算产量[21]。

1.5　土壤钠吸附比和质量指数计算方法

土壤钠吸附比(SAR)参考夏雨龙等[22]的方法,计算公式如下:

$$SAR=\frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2}} \tag{1}$$

式中,Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}分别代表相应离子浓度,mmol/L;SAR为钠吸附比,$(mmol/L)^{1/2}$。

本研究采用"越多越好"型指标评分函数式[22](公式2)和"越少越好"型指标评分函数式[23](公式3)这2种线性计算模型,分别将土壤养分指标和土壤盐碱指标数据转化为0~1的无量纲分数[24]。

$$S_i=\frac{X_i-X_{min}}{X_{max}-X_{min}} \tag{2}$$

$$S_i=\frac{X_{max}-X_i}{X_{max}-X_{min}} \tag{3}$$

式中,S_i代表线性指标得分(0~1),X_i代表指标的实测值,X_{max}代表指标系列的最大值,X_{min}代表指标系列的最小值。

为了计算耕层(0~20 cm)土壤质量指数,利用本研究检测的13个土壤指标进行主成分分析得到公因子方差[25]和权重[26]后,用公式4计算土壤质量指数(soil quality index,SQI)[22]。

$$SQI=\sum_{i=1}^{n}V_iS_i \tag{4}$$

式中,V_i为第i项指标的权重值,S_i为第i项指标得分,n为本研究中数据集的指标数量,n=13。

1.6 统计分析

采用Excel 2013软件整理汇总数据和作图,采用SPSS 22.0软件进行数据分析。利用最小显著性差异(LSD)法进行显著性差异分析($P<0.05$),对土壤养分指标进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂下耕层土壤肥力指标

2.1.1 不同改良剂下土壤pH值

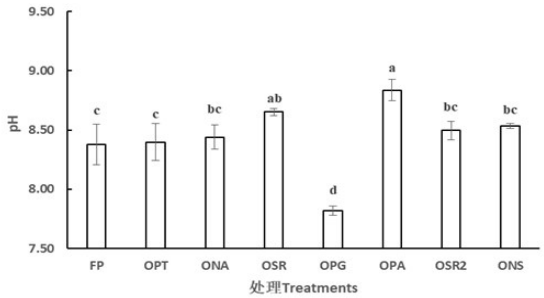
各处理种植第2年玉米收获期耕层土壤pH如图1所示,与FP相比,OSR和OPA处理的pH值分别显著升高3.30%和5.49%;OPG处理的pH值则显著降低6.65%,其余处理pH值无显著差异。

2.1.2 不同改良剂下土壤可溶性总盐含量

由图2可见,不同改良剂对耕层土壤可溶性总盐含量的影响差异较大,其中OPG和OSR2处理的可溶性总盐含量较FP分别显著降低39.35%和63.89%,而ONS的可溶性总盐含量则较FP显著升高37.50%。此外,等量微矿粉分次施用(OSR2)较小麦季集中施用(OSR)显著降低耕层土壤可溶性总盐含量65.79%,降盐效果最佳。

2.1.3 不同改良剂下土壤水溶性阳离子含量

如表1所示,除OPG处理耕层土壤中的水溶性Mg^{2+}显著低于其余处理外,各处理对耕层土壤中的水溶性Ca^{2+}、Mg^{2+}和K^{+}含量的影响均无显著差异。不同改良剂对Na^{+}含量的影响存在较大差异,其中ONA、OPA和OSR2处理的Na^{+}含量较FP分别显著提高59.26%、295.1%和46.30%,而OSR和OPG处理的Na^{+}含量较FP分别显著降低65.43%和96.30%。与FP处理相比,OPT(优化施肥)、OSR和OPG处理的SAR值分别显著降低56.45%、69.55%和96.22%,而ONA和OPA处理的SAR值则分别显著增加49.83%和260.24%。此外,等量微矿粉分次施用处理(OSR2)的耕层土壤Na^{+}含量和SAR值分别为小麦季集中施用(OSR)的4.23和4.36倍,差异显著。



FP为常规施肥,OPT为优化施肥,ONA为优化施肥+硝基腐植酸,OSR为优化施肥+微矿粉,OPG为优化施肥+磷石膏,OPA为优化施肥+聚丙烯酰胺,OSR2为优化施肥+分次施微矿粉,ONS为优化施肥+组合改良。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。图2~图3同

FP: conventional fertilization; OPT: optimized fertilization; ONA: optimized fertilization plus nitro-humic acid; OSR: optimized fertilization plus micro-mineral powder; OPG: optimized fertilization plus phosphogypsum; OPA: optimized fertilization plus polyacrylamide; OSR2: optimized fertilization plus split application of micro-mineral powder; and ONS: optimized fertilization plus combined improvement. The different lowercase letters in the figure indicated the significant difference levels reached among different treatments($P<0.05$). The same as Fig. 2 and Fig. 3

图1 收获期土壤pH值

Fig.1 Soil pH value during the harvest period

2.1.4 不同改良剂下土壤养分指标

如表2所示,各处理耕层土壤全氮、有机质、有

表1 收获期土壤水溶性阳离子含量

Table 1 Content of water-soluble cations in topsoil during the harvest period

处理 Treatments	Ca^{2+}/(cmol/kg)	Mg^{2+}/(cmol/kg)	K^{+}/(cmol/kg)	Na^{+}/(cmol/kg)	SAR/(mmol/L)$^{1/2}$
FP	14.95±3.09a	3.25±0.84a	0.12±0.02a	0.01±0.00c	9.03±1.76cd
OPT	17.45±2.48a	3.40±0.80a	0.11±0.02a	0.01±0.00cd	3.93±0.54e
ONA	16.94±2.74a	3.55±1.27a	0.12±0.01a	0.02±0.00b	13.53±3.36b
OSR	19.97±1.29a	3.20±0.32a	0.11±0.02a	0.00±0.00de	2.75±0.94ef
OPG	18.53±3.26a	1.80±0.73b	0.10±0.02a	0.00±0.00e	0.34±0.59f
OPA	18.18±2.32a	3.48±0.41a	0.10±0.01a	0.05±0.00a	32.53±2.16a
OSR2	17.71±2.21a	4.06±0.45a	0.13±0.01a	0.02±0.00b	11.99±0.70bc
ONS	18.84±3.63a	3.27±0.99a	0.11±0.04a	0.01±0.00c	5.87±0.14de

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表2、表6同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences among treatments ($P<0.05$). The same as Table 2 and Table 6.

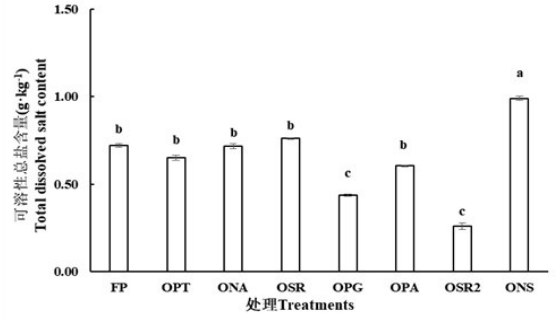


图2　收获期土壤可溶性总盐含量

Fig.2　Total dissolved salt content in topsoil during the harvest period

效磷和NH_4^+-N含量与FP处理均无显著差异;仅OSR处理的耕层土壤有效钾含量较FP显著降低21.87%,其余处理与其无显著差异。不同改良剂对耕层土壤NO_3^--N含量影响差异较大,但仅ONA和ONS较FP处理分别显著提高56.00%和86.40%。此外,等量微矿粉分次施用(OSR2)使耕层土壤有机质、有效钾和NO_3^--N含量较集中施用(OSR)分别显著提高了44.77%、32.94%和90.26%,对土壤肥力提升的效果较好。

表2　收获期耕层土壤养分指标含量

Table 2　The content of soil nutrient indicators in the plough layer during the harvest period

处理 Treatments	全氮/(g/kg) Total N	有机质/(g/kg) Organic matter	有效磷/(mg/kg) Olsen-P	有效钾/(mg/kg) Available K	NO_3^--N/(mg/kg)	NH_4^+-N/(mg/kg)
FP	0.48±0.02a	10.19±2.06ab	20.80±2.16ab	439.00±22.11ab	3.75±1.57bcd	1.45±0.29a
OPT	0.59±0.11a	10.24±2.61ab	20.44±2.27ab	405.00±60.89abc	5.28±0.32ab	1.52±0.16a
ONA	0.53±0.07a	10.75±0.81ab	18.76±2.50ab	405.00±54.74abc	5.85±0.25a	0.99±0.40a
OSR	0.57±0.06a	8.87±1.94b	15.75±7.74ab	343.00±19.31c	2.60±1.11d	1.35±0.06a
OPG	0.63±0.10a	10.66±1.56ab	24.30±5.78a	366.00±50.47bc	3.19±2.73cd	1.11±0.58a
OPA	0.55±0.07a	9.72±0.43ab	12.80±2.59b	385.00±32.08abc	5.27±0.79ab	1.07±0.51a
OSR2	0.62±0.04a	12.84±2.41a	21.17±4.85ab	456.00±46.67a	4.95±1.06abc	1.54±0.45a
ONS	0.49±0.02a	9.99±2.04ab	18.01±5.49ab	388.50±13.44abc	6.99±0.29a	0.84±0.17a

2.2　不同改良剂对土壤肥力影响的综合评价

2.2.1　土壤质量指数评价

利用13个指标的全数据集计算不同处理耕层的SQI(表3)。本研究采用“越多越好”和“越少越好”型指标评分计算函数式,其中对土壤性质有正效应的指标采用“越多越好”函数式,包括土壤NO_3^--N、NH_4^+-N、有机质、全氮、有效磷、有效钾、水溶性Ca^{2+}、Mg^{2+}和水溶性K^+;对土壤性质有负效应的指标则应用“越少越好”型函数式,包括土壤pH、可溶性总盐含量、水溶性Na^+、SAR。用公式(4)计算土壤SQI,数值越高表明土壤质量越好[22]。

如图3所示,与FP处理相比,不同改良剂处理对土壤质量指数的影响差异较大,其中OPA的SQI值显著降低34.72%。SQI值最高的处理为OSR2,达0.67,与FP无显著差异,但较ONA、OSR、OPA和ONS分别显著升高29.00%、37.61%、90.66%和33.30%。

2.2.2　土壤肥力指标的主成分分析

对原始数据开展主成分分析前进行的Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和巴特利特球形度检验,

表3　土壤质量指数评价指标的公因子方差和权重

Table 3　The Communality and weight of the evaluation indicators of SQI

指标 Indicators	公因子方差 Communality	权重 Weight
全氮 Total N	0.663	0.063
有机质 Organic matter	0.861	0.082
有效磷 Olsen-P	0.818	0.078
有效钾 Available K	0.779	0.074
pH	0.878	0.083
可溶性总盐 Total dissolved salt	0.754	0.071
NO_3^--N	0.783	0.074
NH_4^+-N	0.843	0.080
Ca^{2+}	0.751	0.071
Mg^{2+}	0.740	0.070
K^+	0.895	0.085
Na^+	0.900	0.085
SAR	0.883	0.084

KMO取样适切性量数为0.595(>0.500),表明13个指标因素间关联程度较高($P<0.05$),适合进行主成分分析。

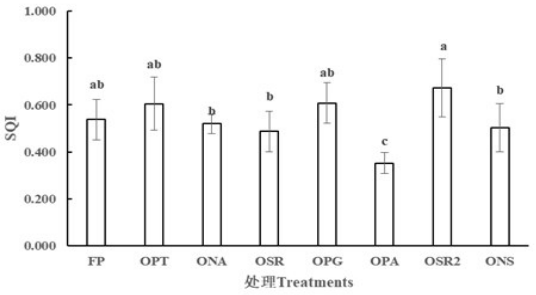


图3 收获期土壤质量指数

Fig. 3 Soil quality index during harvest stage

针对13个土壤指标,采用主成分分析进一步筛选出影响土壤质量的主要性状指标(表4),其中前4个主成分的特征值都大于1且累计方差贡献率达81.158%,说明这4个主成分可以反映13项指标的大部分信息。

利用4个主成分得分(P1、P2、P3、P4)及权重构造综合得分($P_{综}$)评价模型,根据特征值为权重建立4个主成分的得分表达式:$P_{综}$=(33.241×P1+27.553×P2+11.550×P3+8.814×P4)/81.158,计算各处理综合得分及排序如表5所示。综合得分最高的处理为OSR2,其次为OPA。

表4 主成分分析的特征值、方差贡献率、累计方差贡献率和载荷矩阵

Table 4 The eigenvalues, variance contribution rate, cumulative variance contribution rate and loading matrix of PCA

项目 Items	载荷系数 Loading parameters			
	PC1	PC2	PC3	PC4
全氮 Total N	0.401	−0.344	0.528	−0.324
有机质 Organic matter	0.907	0.039	0.035	−0.189
有效磷 Olsen−P	0.701	−0.563	−0.094	0.028
有效钾 Available K	0.799	0.348	−0.128	−0.057
pH	−0.322	0.767	0.191	0.386
可溶性总盐 Total dissolved salt	−0.570	0.144	−0.543	0.337
NO_3^-−N	0.126	0.590	−0.549	−0.344
NH_4^+−N	0.350	−0.301	0.397	0.688
Ca^{2+}	−0.801	−0.198	0.218	−0.153
Mg^{2+}	0.487	0.688	−0.090	0.146
K^+	0.871	0.175	−0.164	0.281
Na^+	−0.055	0.847	0.409	−0.115
SAR	−0.025	0.846	0.396	−0.102
特征值 Eigenvalue	4.321	3.582	1.502	1.146
方差贡献率/% Variance contribution rate	33.241	27.553	11.550	8.814
累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	33.241	60.794	72.344	81.158

表5 不同处理综合得分及排序

Table 5 Comprehensive Scores and rankings of different treatments

处理 Treatment	P1	P2	P3	P4	$P_{综}$	排序 Ranking
FP	0.97	0.00	−0.67	1.15	0.43	3
OPT	0.52	−0.62	−0.30	0.39	0.00	5
ONA	0.27	0.95	−0.75	−0.35	0.29	4
OSR	−1.62	−0.88	0.40	1.09	−0.79	7
OPG	0.16	−3.21	0.42	−1.48	−1.13	8
OPA	−1.17	3.05	1.52	−0.44	0.72	2
OSR2	2.53	0.46	1.16	−0.30	1.32	1
ONS	−1.20	0.60	−2.08	−0.23	−0.61	6

2.3 不同改良剂下作物年产量

研究期内不同改良剂对小麦-玉米年度产量的影响如表6所示。种植第1年小麦季时,仅ONA和OSR2处理较FP分别显著增产21.01%和21.69%;玉米季时,各改良剂处理的产量与FP均无显著差异。第2年小麦季,仅OSR2处理较FP显著增产28.92%,其余处理与FP无显著差异;各处理玉米季产量均无显著差异。此外,等量微矿粉分次施用(OSR2)较集中施用(OSR)在2季小麦上均表现出显著的增产效果,平均增产率达26.06%;但玉米季亦无显著差异。就研究期内作物平均年产量而言,OSR2处理较FP显著增产10.84%,但其余处理均与FP无显著差异。等量微矿粉分次施用(OSR2)的平均年产量最高,达14.72 t/hm^2,较集中施用(OSR)显著增产8.00%。

3 讨论

3.1 不同改良剂对土壤肥力指标的影响

本研究中,连续施用聚丙烯酰胺后第2年玉米收获期耕层土壤pH显著提高,这与杨洋[27]对不同磷水平下2种改良剂影响盐渍化土壤理化性质的研究结果相反。一方面可能与PAM溶于水后呈碱性[27-28],且灌溉水为黄河水,pH背景值相对较高

表6　不同改良剂对作物产量的影响

Table 6　The impact of different modifiers on the crop yield　　t/hm²

处理 Treatments	种植第1年 The 1st year of planting		种植第2年 The 2nd year of planting		平均 Average		平均年产量 Average annual yield
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	
FP	5.14±0.37b	8.23±0.69ab	5.89±0.89bc	7.32±0.18a	5.51±0.57cd	7.77±0.38ab	13.28±0.68bc
OPT	5.50±0.40ab	7.68±0.93b	6.00±0.42bc	7.12±0.58a	5.75±0.35c	7.40±0.29b	13.15±0.43bc
ONA	6.22±0.90a	8.00±0.25ab	6.27±0.36bc	7.02±0.65a	6.25±0.47b	7.51±0.20ab	13.76±0.67b
OSR	5.04±0.65b	9.57±0.48a	5.95±0.32bc	6.71±0.86a	5.49±0.47cd	8.14±0.22a	13.63±0.65b
OPG	5.13±0.68b	8.16±0.85ab	5.39±0.78c	6.60±0.12a	5.26±0.43d	7.38±0.37b	12.64±0.08c
OPA	5.85±0.54ab	7.59±1.15b	5.80±0.38bc	7.16±0.53a	5.83±0.19bc	7.37±0.31b	13.20±0.14bc
OSR2	6.26±0.26a	8.29±0.86ab	7.60±0.18a	7.30±0.08a	6.93±0.04a	7.79±0.39ab	14.72±0.43a
ONS	4.95±0.48b	8.11±0.54ab	6.47±0.13b	6.72±0.06a	5.71±0.31cd	7.42±0.30b	13.13±0.01b

有关;另一方面也与本研究中选取的聚丙烯酰胺规格为阴离子型800万分子量,在一定程度上会加重土壤盐碱化程度[29]有关。施用微矿粉在一定程度上也提高了土壤pH,可能是因为SRM比表面积较大,阳离子交换量高[18],这可能也是造成OSR2处理SAR值较农民习惯明显增加的原因。但是,连续底施磷石膏较常规施肥显著降低了耕层土壤pH和可溶性总盐含量,这与徐鑫[30]的研究结论是一致的。此外,连续底施磷石膏的耕层土壤SAR值显著降低,这一方面是由于磷石膏中富含的Ca^{2+}对土壤胶体中的Na^{+}有较强的置换作用,增强了土壤溶液中的Na^{+}迁移[31];另一方面则是由于在土壤有机质和黏土颗粒间形成的钙离子桥,改变了土体结构的渗水性,从而促进了盐分的淋洗[32]。

本研究结果表明硝基腐植酸和微矿粉配施处理的可溶性总盐含量显著高于其余处理,而Na^{+}含量和SAR值相对较低,这可能是因为二者对阳离子均具有较强的吸附和交换能力,有利于Na^{+}的解吸[30]。这2种改良剂可促进土壤团聚体的形成、改善土壤空隙和结构,在前期能够有利于土壤离子的排出[33],但在玉米收获期,土壤蒸发量相对较大的条件下,可能在一定程度上增加了土壤返盐的风险[19]。

综上所述,不同改良剂对盐碱地耕层土壤肥力指标的影响表现各不相同,难以通过单个指标的差异性进行评价,将研究中涉及的指标进行综合评价,无疑是更全面客观的方法。

3.2　不同改良剂对土壤肥力影响综合评价

鉴于各类土壤肥力指标单位不同,且指标间关系相对复杂,仅靠简单或单一的统计方法难以直接比较改良剂效果的优劣,本研究采用土壤质量指数(SQI)和主成分分析(PCA)2种方法相结合[34-35]进行综合评价。首先利用全数据集计算不同处理的土壤质量指数SQI,之后结合主成分分析法评价不同改良剂对黄三角盐碱地改良效果。结果显示,优化施肥及优化施肥基础上底施磷石膏和小麦玉米季分别底施微矿粉3项技术措施下,土壤质量指数SQI分别增高12.08%、12.60%和24.38%,其中优化施肥基础上小麦玉米季分别底施微矿粉措施的SQI值最高。其次,通过主成分分析法进行降维建模评分发现,优化施肥基础上小麦玉米季分别底施微矿粉措施的综合得分远高于其余处理,而优化施肥及优化施肥基础上底施磷石膏措施的综合得分却远低于常规施肥,这可能与本研究中选取的数据集指标主要以化学指标为主有关,后续研究中可适当增加土壤机械组成、团聚体结构、微生物量碳和酶活性等物理和生物学指标的测定[35],以便更真实地反映土壤质量变化情况。此外,结合研究期内小麦、玉米产量分析,优化施肥基础上小麦、玉米季分别底施微矿粉为本研究中的最优技术措施;但实际应用该技术措施时,应注意与其它农艺措施结合,以降低土壤Na^{+}含量和SAR值,此外,对于长期施用微矿粉所可能引发的环境风险[3]也应开展进一步研究。

4　结论

本研究中优化施肥基础上连续底施磷石膏对耕层土壤pH、可溶性总盐含量和SAR值有显著的改良效果,并在一定程度上提升了耕层土壤质量指数,但主成分分析综合得分较低;优化施肥基础

上小麦、玉米季分别底施微矿粉较常规施肥显著降低了玉米收获期耕层土壤可溶性总盐含量,土壤质量SQI值最高,且主成分分析综合得分和作物年产量均远高于其余处理,为本研究中的最优技术措施,但后续研究中可考虑与磷石膏进行组合施用以提升改良效果,同时注意加强安全性评价。

参 考 文 献

[1]王高祥,苏小四,张岩,等.连云港徐圩新区盐渍土盐分时空分布特征及其主要影响因素分析[J].安全与环境工程,2021,28(3):16-24.
Wang G X, Su X S, Zhang Y, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of salinity in saline soil and its main influencing factors in Xuwei New District of Lianyungang[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(3):16-24.

[2]Ondrasek G, Rengel Z. Environmental salinization processes: detection, implications & solutions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754:142432.

[3]吕航,赵月,龚绪龙,等.我国滨海盐碱地改良技术综述及案例研究[J].水文地质工程地质,2025,52(2):25-43.
Lü H, Zhao Y, Gong X L, et al. Review of techniques and case studies for saline-alkali land amelioration in the coastal regions of China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2025, 52(2): 25-43.

[4]朱福鑫.不同改良剂对苏打盐碱土的改良效果及产量影响[D].长春:吉林农业大学,2023.
Zhu F X. The improvement effect and yield impact of different modifiers on soda saline alkali soil [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.

[5]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.
Xu W H, Wang J L, Liu X J, et al. Scientific and technological reasons, contents and corresponding policies of constructing "coastal grass belt" [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 238-245.

[6]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.
Sun S N, Yan X B, Yin F H. Current situation and prospect of improvement and comprehensive utilization for saline-alkali land of coastal tidal flats in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(2):1-13.

[7]罗淋丹.不同改良材料对滨海盐土的改良效果研究[D].北京:中国农业科学院,2024.
Luo L D. Research on the efficiency of different amendments in coastal Saline soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.

[8]徐婷,柳延涛,王海江.花生耐盐碱响应机制及缓解措施的研究进展[J].中国农学通报,2021,37(16):8-12.
Xu T, Liu Y T, Wang H J. Response mechanism and mitigation measures of peanut salt tolerance: research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(16):8-12.

[9]Fouladidorhani M, Shayannejad M, Shariatmadari H, et al. Biochar, manure, and super absorbent increased wheat yields and salt redistribution in a saline-sodic soil [J]. Agronomy Journal, 2020, 112(6): 5193-5205.

[10]张昊,樊文华,田剑,等.不同改良剂施用量和次数对黄土区煤矿复垦土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用与环境生物学报,2023,29(4):987-993.
Zhang H, Fan W H, Tian J, et al. Effects of different application amounts and amendment timings on soil aggregates and organic carbon content of reclaimed coal mine in the loess region [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(4): 987-993.

[11]高小龙,王幼奇,白一茹,等.脱硫石膏添加下盐碱土水分入渗特征分析[J].中国水土保持科学,2022,20(5):66-74.
Gao X L, Wang Y Q, Bai Y R, et al. Analysis of moisture infiltration in saline-alkali soil while adding desulfurized gypsum [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(5):66-74.

[12]Chi Z F, Wang W J, Li H, et al. Soil organic matter and salinity as critical factors affecting the bacterial community and function of *Phragmites australis* dominated riparian and coastal wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143156.

[13]陆海玲.有机肥配施盐碱土壤改良剂对盐碱地土壤性状及甜菜产量和品质的影响[J].寒旱农业科学,2024,3(10):944-948.
Lu H L. Effects of organic fertilizer combined with saline-alkaline soil amendments on soil properties, sugar beet yields, and quality in saline-alkaline land [J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2024, 3(10):944-948.

[14]吴绪海,李家亮,谢黎栋,等.苏打盐碱地水田治理技术研究进展[J/OL].农业资源与环境学报,2025:1-21.(2025-03-07)[2025-04-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1437.S.20250307.1030.002.
Wu X H, Li J L, Xie L D, et al. Advances in amelioration technologies of sodic/saline sodic paddy fields of rice[J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025: 1-21. (2025-03-07)[2025-04-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1437.S.20250307.1030.002.

[15]王树玉.苏打盐碱地稻田水盐平衡与节水降碱排盐路径研究[D].哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2024.
Wang S Y. Water and salt balance and its regulating pathways of water saving, salinity and alkalinity reduction in saline-alkali soils ameliorated by phospogypsum, manuring with irrigation and drainage during the critical growth stages of rice [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2024.

[16]朱福军,丁方军,吴钦泉,等.含腐植酸土壤调理剂对盐碱土的淋洗效应[J].腐植酸,2017,(6):17-27,49.
Zhu F J, Ding F J, Wu Q Q, et al. Effects of soil conditioners containing humic acid on leaching of saline-alkali soil [J]. Humic Acid, 2017, (6): 17-27, 49.

[17]庞春花,杨洋,张永清,等.两种改良剂对晋南盐碱地土壤性质及藜麦产量的影响[J].西北农业学报,2022,31(9):1185-1193.
Pang C H, Yang Y, Zhang Y Q, et al. Effects of two amendments on soil properties and quinoa yield in saline-alkaline soil in south Shanxi [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022,31(9):1185-1193.

[18]吴昌宁,翁力,李俊国,等.微矿分离:煤炭清洁化与土壤改

良的新契机[J].科学通报,2021,66(25):3352-3364.
Wu C N, Weng L, Li J G, et al. A novel mineral separation process: new opportunity for clean coal utilization and soil remediation[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(25): 3352-3364.

[19]韩伟涛,冯叶,刘文全.滨海废弃盐田复垦后土壤盐分和养分的空间变异特征[J].地球与环境,2025,53(3):421-430.
Han W T, Feng Y, Liu W Q. Spatial variation characteristics of soil salinity and nutrient after reclamation of abandoned coastal salt pans[J]. Earth and Environment, 2025, 53(3): 421-430.

[20]鲍士旦.土壤农化分析3版[M].北京:中国农业出版社,2000:178-192.
Bao S D. Soil agro-chemistry analysis 3rd[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 178-192

[21]杨康,吴坤燕,孙瑞,等.有机肥部分替代化肥对华北小麦-玉米农田氮素损失及氮平衡的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(3):484-497.
Yang K, Wu K Y, Sun R, et al. Effect of partial replacement of mineral fertilizer by manure on nitrogen losses and balance from wheat-maize farmland in North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3): 484-497

[22]夏雨龙,陈美彤,刘嘉慧,等.不同改良剂对苏打盐碱地土壤质量及水稻产量的影响[J/OL].吉林农业大学学报,2025:1-11.(2025-03-15)[2025-04-20]. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2025.0031.
Xia Y L, Chen M T, Liu J H, et al. The effects of different amendments on soil quality and rice yield in soda saline alkali land[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, 2025: 1-11.(2025-03-15)[2025-04-20]. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2025.0031.

[23]李鹏飞,张兴昌,郝明德,等.基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35(16):265-273.
Li P F, Zhang X C, Hao M D, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 265-273.

[24]田荣荣,王淑娟,刘嘉,等.根区施用生物炭和脱硫石膏提高盐碱土壤质量及向日葵产量[J].农业工程学报,2024,40(5):148-157.
Tian R R, Wang S J, Liu J, et al. Applying biochar and flue gas desulfurization gypsum in the root zone to improve saline-alkali soil quality and sunflower yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 148-157.

[25]陈正发,史东梅,金慧芳,等.基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35(3):256-267.
Chen Z F, Shi D M, Jin H F, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 256-267.

[26]Rahmanipour F, Marzaioli R, Ali Bahrami H, et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran[J]. Ecological Indicators, 2014, 40:19-26.

[27]杨洋.不同磷水平下两种改良剂对盐渍化土壤理化性质及藜麦生长的影响[D].临汾:山西师范大学,2022.
Yang Y. Effects of two amendments at different phosphorus levels on the physical and chemical properties of saline soil and the growth of quinoa[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2022.

[28]张凌云,赵庚星,徐嗣英,等.滨海盐渍土适宜土壤盐碱改良剂的筛选研究[J].水土保持学报,2005,19(3):21-23,28.
Zhang L Y, Zhao G X, Xu S Y, et al. Filtration of suitable saline-alkali soil amendments on coastal saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,19(3):21-23,28.

[29]马鑫,魏占民,张凯,等.低分子量聚丙烯酰胺对盐渍化土壤水动力参数的影响[J].土壤,2014,46(3):518-525.
Ma X, Wei Z M, Zhang K, et al. Influence of low molecular weight polyacrylamide on soil hydrodynamic parameters[J]. Soils, 2014, 46(3): 518-525.

[30]徐鑫.基于磷石膏的土壤改良剂对盐碱地的改良和安全性评价[D].北京:北京化工大学,2023.
Xu X. Improvement and safety evaluation of phosphogypsum-based soil amendment in mitigating soil salinity stress[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.

[31]Day S J, Norton J B, Strom C F, et al. Gypsum, langbeinite, sulfur, and compost for reclamation of drastically disturbed calcareous saline-sodic soils[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(1): 295-304.

[32]王舒华.不同改良剂对黄河三角洲盐碱土盐分去除和有机质提升效果的研究[D].南京:南京农业大学,2021.
Wang S H. Effects of different amendments on salt removal and organic matter enhancement of saline-alkali soil in the Yellow River Delta[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.

[33]Ahmad S, Ghafoor A, Akhtar M E, et al. Implication of gypsum rates to optimize hydraulic conductivity for variable-texture saline-sodic soils reclamation[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(3):550-560.

[34]杨右君,冯浪佳,任科润,等.6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价[J/OL].农业资源与环境学报,2025:1-12.(2025-03-13)[2025-04-20]. https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0969.
Yang Y J, Feng L J, Ren K R, et al. Comprehensive evaluation of the effects of six soil conditioners on the amelioration of acidic paddy soils[J/OL].(2025-03-13)[2025-04-20]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025:1-12. https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0969.

[35]李鑫,张文菊,邬磊,等.土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J].中国农业科学,2021,54(14):3043-3056.
Li X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056.

(编辑:郭玥微)