DOI:10.11686/cyxb2025401 http://cyxb.magtech.com.cn
张丁文, 李洋, 李振恺, 等. 夏季覆盖种植对黄河三角洲盐碱农田土壤肥力的影响. 草业学报, 2026, 35(10): 15－29.
ZHANG Ding-wen, LI Yang, LI Zhen-kai, *et al*. Effects of summer cover cropping on soil fertility in saline-alkali farmland of the Yellow River Delta. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 15－29.

夏季覆盖种植对黄河三角洲盐碱农田土壤肥力的影响

张丁文[1,2,7], 李洋[1], 李振恺[1,2,7], 董世德[1], 刘汉文[1], 于春晓[1], 温樱[5], 陈英姿[6], 王光美[1,2,3,4*]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 黄河三角洲盐碱地农田生态系统观测研究站, 山东 东营 257300; 3. 国家盐碱地综合利用技术创新中心, 山东 东营 257347; 4. 山东省黄河三角洲发展集团有限公司, 山东 东营 257300; 5. 烟台市福山区农业农村局, 山东 烟台 265599; 6. 黄河三角洲农业高新技术产业示范区科研和人才服务中心, 山东 东营 257345; 7. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 盐碱农田土壤肥力提升是盐碱地改良与高质量开发的重要标志。为探明夏季覆盖种植对黄河三角洲盐碱农田土壤肥力的影响, 于中国科学院烟台海岸带研究所黄河三角洲盐碱地农田生态系统观测研究站开展了田间试验, 设置轻度(0.2%)、中度(0.4%)2个土壤盐分水平, 高丹草－冬小麦(HW)、田菁－冬小麦(SW)、夏玉米－冬小麦(MW)3种轮作方式, 共6个处理, 每个处理3个重复, 以当地传统夏玉米－冬小麦轮作为对照, 探明土壤盐分水平与夏季覆盖作物类型对后茬冬小麦土壤肥力指数(SFI)的影响。结果表明, 在轻度盐分土壤中, 与MW相比, HW和SW土壤肥力指数在播种期分别提升了46.24%和19.98%, 返青期分别提高了8.61%和7.12%, 成熟期HW提高了14.29%。中度盐分土壤中, 与MW相比, HW土壤肥力指数在播种期提升了14.67%。同种轮作方式下, HW在轻度盐分下播种期土壤肥力指数高于中度盐分, 而MW则在中度盐分下成熟期土壤肥力指数高于轻度盐分。土壤肥力指数与土壤速效磷、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷和全钾呈显著正相关关系, 而与土壤盐分呈显著负相关关系。综合来看, 高丹草－冬小麦和田菁－冬小麦轮作均可提升轻度盐分农田的土壤肥力, 可作为黄河三角洲盐碱地改良的轮作方式。

关键词: 黄河三角洲; 盐碱农田; 覆盖作物; 绿肥; 土壤肥力

Effects of summer cover cropping on soil fertility in saline-alkali farmland of the Yellow River Delta

ZHANG Ding-wen[1,2,7], LI Yang[1], LI Zhen-kai[1,2,7], DONG Shi-de[1], LIU Han-wen[1], YU Chun-xiao[1], WEN Ying[5], Chen Ying-zi[6], WANG Guang-mei[1,2,3,4*]

1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*; 2. *Yellow River Delta Saline-Alkali Agro-ecosystem Observation and Research Station, Dongying* 257300, *China*; 3. *National Center of Technology Innovation for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying* 257347, *China*; 4. *Shandong Province Yellow River Delta Development Group Co., Ltd., Dongying* 257300, *China*; 5. *Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Fushan District, Yantai* 265599, *China*; 6. *Scientific Research and Talent Service Center of Agricultural High-tech Industrial Demonstration Area of the Yellow River Delta, Dongying* 257345, *China*; 7. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Improvement of soil fertility in saline-alkali farmland is a key indicator of the improvement and high-quality development of saline-alkali land. This research investigated the effects of summer cover cropping on soil fertility in

收稿日期:2025-09-30; 改回日期:2026-01-05
基金项目:国家自然科学基金(42407607), 山东省自然科学基金(ZR2022QC148)和山东省重点研发项目(2023TZXD087-1)资助。
作者简介:张丁文(2001－), 女, 四川南充人, 在读硕士。E-mail: zhangdingwen23@mails.ucas.ac.cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: gmwang@yic.ac.cn

saline-alkali farmland of the Yellow River Delta. A field experiment was conducted at the Yellow River Delta Saline-Alkali Agro-ecosystem Observation and Research Station, which is affiliated with the Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences. Two levels of soil salinity were established: light salinity (0.2%) and moderate salinity (0.4%). Three crop rotation systems were used: sorghum-sudangrass hybrid (*Sorghum bicolor*×*Sorghum sudanense*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) (HW), sesbania (*Sesbania cannabina*)-winter wheat (SW), and summer maize (*Zea mays*)-winter wheat (MW), resulting in six treatments with three replicates each. The local traditional summer maize-winter wheat rotation was utilized as the control. The present study investigated the effects of soil salinity levels and summer cover crop types on the soil fertility index (SFI) of the subsequent winter wheat crop. It was found that under light salinity, SFI in HW and SW increased by 46.24% and 19.98%, respectively, at sowing stage, and by 8.61% and 7.12%, respectively, at regreening stage, compared with MW. At maturity stage, HW showed an increase of 14.29% compared to MW. Under moderate salinity, SFI in HW at sowing stage was 14.67% higher than that in MW. For a given rotation system, HW exhibited a higher SFI at sowing stage under light than under moderate salinity, whereas MW showed a higher SFI at maturity stage under moderate than under light salinity. SFI was significantly positively correlated with soil available phosphorus, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium, and significantly negatively correlated with soil salinity. Overall, both the sorghum-sudangrass hybrid-winter wheat and sesbania-winter wheat rotations improved soil fertility in lightly saline farmland and can be considered suitable rotation patterns for the amelioration of saline-alkali land in the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; saline-alkali farmland; cover crops; green manure; soil fertility

我国盐碱地面积约为3.69×10^7 hm^2,合理开发盐碱地资源对解决我国耕地锐减、保障粮食安全具有重要意义[1]。黄河三角洲是中国滨海盐碱地的代表性区域[2],其盐碱地资源丰富,但土壤含盐量高、板结重、结构差、肥力低,严重限制了作物生长[3]。土壤肥力是制约作物产量形成、耕地质量维持和农业可持续发展的关键因素之一[4]。低肥力农田通常表现为基础养分含量偏低或养分失衡[5],土壤微生物活性降低,进而限制养分吸收、削弱根系生长和抑制作物生长发育[6],导致产量和品质下降[7],并降低农田生态系统的可持续生产能力。因此,提升土壤肥力对盐碱地改良具有重要意义。

覆盖作物种植是盐碱地生物改良措施之一,其在改善土壤肥力,提升作物产量方面具有较大的潜力。在土壤肥力方面,Boselli等[8]在意大利通过田间试验发现,覆盖作物可增加土壤有机质及养分含量,从而恢复土壤肥力。同样,Zheng等[9]研究发现,在黄河三角洲种植耐盐豆科植物,可降低土壤盐分含量,并增加土壤全碳、全氮及硝态氮含量。Nouri等[10]通过荟萃分析发现,覆盖作物可减少69%的硝酸盐淋失,其中十字花科和禾本科的覆盖作物效果较好。Jian等[11]通过同样的方法发现,在轮作中引入覆盖作物可显著增加土壤有机碳含量。在产量方面,Yang等[12]发现种植豆科覆盖作物代替氮肥,对玉米(*Zea mays*)产量没有显著影响,减少了化肥投入。马佳玉等[13]采用荟萃分析发现,种植覆盖作物后小麦(*Triticum aestivum*)、玉米产量分别增加了9.5%和19.6%。廖恒等[14]研究发现,在贵州黄壤区种植光叶苕子(*Vicia villosa* var. *glabresens*)并减施15%的化肥,可增加52%的籽粒产量,这不仅减少了化肥投入,还提升了产量。但也有研究发现,在干旱或水资源短缺地区,与休耕相比,种植覆盖作物后茬小麦产量平均减少10%[15]。综合来看,覆盖作物种植可改善土壤肥力、减少化肥农药等投入并影响后茬粮食的产量。然而,在滨海盐碱地,不同土壤盐分下覆盖作物类型对土壤肥力的影响仍不明确。

根据覆盖作物功能,可分为土壤培肥类、饲草深根类等。其中,土壤培肥类覆盖作物,如毛叶苕子(*Vicia villosa*)、光叶苕子、田菁(*Sesbania cannabina*)、野豌豆(*Vicia sepium*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等,翻压还田后可提升土壤有机质及养分含量;饲草深根类,如黑麦(*Secale cereale*)、高丹草(*Sorghum bicolor*×*S. sudanense*)、黑麦草(*Lolium perenne*)等,不仅能改善土壤物理性质,还可产出经济效益[16]。 为探明不同土壤盐分下覆盖作物种植对

土壤肥力的影响，本研究选取田菁（土壤培肥类）、高丹草（饲草深根类）2 种典型夏季覆盖作物与冬小麦进行轮作，以传统夏玉米－冬小麦轮作为对照，设置 2 种土壤盐分（2‰和 4‰），通过测定土壤养分指标，构建土壤肥力指数，探明土壤盐分及覆盖作物类型对盐碱农田土壤肥力的影响，以期为该地区盐碱地综合改造利用、种植结构调整提供理论和技术依据，支撑黄河三角洲农业的高质量发展。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本研究田间控制试验位于中国科学院烟台海岸带研究所黄河三角洲盐碱地农田生态系统观测研究站（37°18′0.13″ N，118°39′4.64″ E），地处山东省黄河三角洲农业高新技术产业示范区。试验区域属温带半湿润大陆性季风气候，年均气温 12.8 ℃，雨热同期，属黄河水系，年均降水量 587.4 mm，65% 降水集中在 7－9 月，年均无霜期 198 d[17]。该地区主要轮作方式为夏玉米－冬小麦[18]。试验地土壤基本理化指标的平均值如下：含盐量（salt content，Salt）为 2.56‰，pH 为 8.48，全氮（total nitrogen，TN）为 0.94 g·kg^{-1}，全磷（total phosphorus，TP）为 0.69 g·kg^{-1}，全钾（total potassium，TK）为 19.85 g·kg^{-1}，碱解氮（alkali-hydrolyzable nitrogen，AN）为 34.4 mg·kg^{-1}，速效磷（available phosphorus，AP）为 18.13 mg·kg^{-1}，速效钾（available potassium，AK）为 451.85 mg·kg^{-1}，有机质（soil organic matter，SOM）含量为 15.44 g·kg^{-1}，土壤为黄河冲积物母质发育而成的盐化潮土。

1.2　试验设计

本试验始于 2023 年 7 月，共设置 2 种土壤盐分（轻度盐分：2‰左右，中度盐分：4‰左右），选取高丹草、田菁 2 种典型夏季覆盖作物与冬小麦轮作，并以本地传统夏玉米－冬小麦轮作模式为对照，每种处理设置 3 个重复，共计 18 个试验小区，小区长 10 m、宽 5 m，总面积为 50 m^2，小区按随机原则布设（图 1）。土壤盐分通过前期盐分测定后，定量添加当地地下水卤盐使土壤盐分调控至 2‰和 4‰左右。

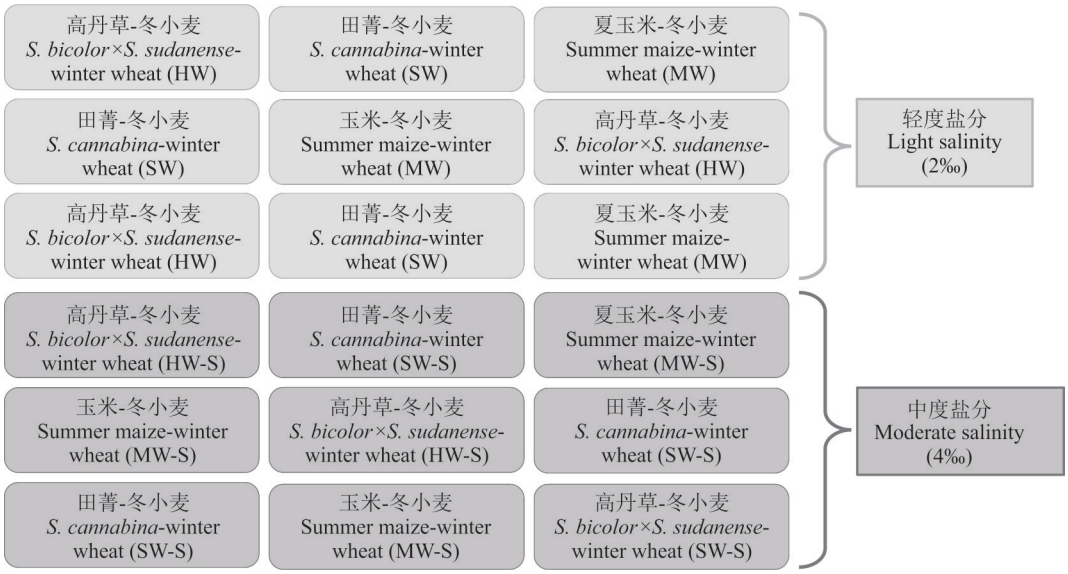


图 1　试验小区设计

Fig. 1　Experimental plot design

2023 年 6－10 月为夏季作物生长期，高丹草、田菁、玉米供试品种分别为‘高丹王草’、‘鲁菁 6 号’、‘登海 605’。高丹草、田菁播种量相同，均为 37.5 kg·hm^{-2}，播种方式均为条播，每行间距 0.6 m；玉米播种方式为点播，每株间距 0.22 m，每行间距 0.6 m。高丹草分别于 2023 年 8 月 29 日、10 月 17 日进行两次刈割，并在第 1 次刈割后施肥（N 220.8 kg·hm^{-2}、P_2O_5 14.4 kg·hm^{-2}、K_2O 60 kg·hm^{-2}）；田菁种植期间不施肥；玉米共施肥 2 次，分别为播种期（N 165.6 kg·hm^{-2}、P_2O_5 36 kg·hm^{-2}、K_2O 54 kg·hm^{-2}）和大喇叭口期（N 69 kg·hm^{-2}）。玉米于 2023 年 10 月

17日收获,秸秆全部还田;田菁于2023年9月21日翻压还田。

2023年10月至2024年6月为冬小麦种植期,供试品种为'烟农999'。冬小麦播种量为300 kg·hm^{-2},播种方式为条播,每行间距0.2 m。分别于播种期和返青期施肥,播种期施肥量为N 95.5 kg·hm^{-2}、P_2O_5 96 kg·hm^{-2}、K_2O 60 kg·hm^{-2},返青期施肥量为N 103.5 kg·hm^{-2}。小麦于2024年6月3日收获测产。

1.3 土壤样品采集及测定方法

每个小区沿其对角线选取3个点,使用直径为5 cm的土钻采集0~20 cm土层土壤样品,充分混合后分为两份,一份阴凉处风干用于测定土壤pH、含盐量、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾含量,另一份鲜土测定土壤含水量、硝态氮、铵态氮含量。土壤样品采集时间分别为小麦播种期(2023年10月21日)、返青期(2024年3月12日,返青期施肥前一周取样)、成熟期(2024年5月28日)。

土壤样品相关指标测定参考《土壤农化分析》[19]。土壤pH采用电位法,水土比5∶1;土壤含盐量(Salt)采用残渣烘干—质量法测定;土壤有机质(SOM)采用$K_2Cr_2O_7$—外加热法测定;土壤全氮(TN)、全磷(TP)采用硫酸—加速剂消解,流动分析仪(SEAL Analytical AA3,德国)测定;土壤全钾(TK)采用硫酸—加速剂消解,原子吸收法测定;土壤铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)采用KCl浸提,流动分析仪(SEAL Analytical AA3,德国)测定;土壤速效磷(AP)采用$NaHCO_3$浸提,流动分析仪(SEAL Analytical AA3,德国)测定;土壤速效钾(AK)采用乙酸铵浸提,原子吸收法测定。

1.4 土壤肥力指数计算

在土壤肥力评价时,单一养分指标难以全面反映土壤肥力水平,需借助多指标集成的定量评价方法[20-21]。其中,内梅罗指数法通过对多项养分指标进行标准化处理,综合考虑指标平均水平与限制性因子(最小值)对植物生长的影响[22],已在林地、耕地及长期施肥试验等多种生态与管理背景下广泛应用并证实具有较高的灵敏度且与作物产量有良好的相关性[23-24]。因此,本研究选用修正内梅罗指数法[20]构建土壤肥力指数,对不同轮作制度与盐分水平下盐碱地土壤综合肥力进行定量评价。

1)土壤肥力指数指标选择和分级标准

土壤肥力指数可以反映土壤条件变化的物理、化学特性,并有效评估土壤质量。参考黄兴成等[20]的方法选取土壤pH、Salt、SOM、TN、TP、TK、NH_4^+-N、NO_3^--N、AP、AK,共10项土壤指标作为土壤肥力指数(soil fertility index, SFI)计算指标。各指标分级参考国家第二次土壤普查养分分级标准[25],结合山东省耕地质量监测指标分级标准和相关文献[26],进行设定,详见表1。

表1 土壤指标分级标准

Table 1 Soil index classification standards

分级 Classification	pH	含盐量 Salt content (‰)	土壤有机质 Soil organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus (g·kg^{-1})	全钾 Total potassium (g·kg^{-1})	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg·kg^{-1})	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg·kg^{-1})	速效磷 Available phosphorus (mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium (mg·kg^{-1})
X_a	8.5	4	10	0.75	0.4	5	1	5	3	40
X_c	7.5	2	20	1.50	0.6	20	5	25	10	100
X_p	6.5	1	30	2.00	1.0	25	10	50	20	150

2)分肥力指数(SFI_i)计算公式[27]:

$$SFI_i=\begin{cases} X/X_a & X\leqslant X_a \\ 1+(X-X_a)/(X_c-X_a) & X_a\leqslant X\leqslant X_c \\ 2+(X-X_c)/(X_p-X_c) & X_c\leqslant X\leqslant X_p \\ 3 & X>X_p \end{cases} \quad (1)$$

式中：X为各土壤指标实测值；X_p、X_a为指标分级的上下限；X_c为分级中间值。

3）土壤肥力指数（SFI）计算

选择修正后的内梅罗指数法进行计算。公式如下：

$$SFI=\sqrt{\frac{(SFI_{iavg})^2+(SFI_{imin})^2}{2}}\times(\frac{n-1}{n}) \quad (2)$$

式中：SFI_{iavg}为10项土壤指标分肥力指数的均值；SFI_{imin}为10项土壤指标分肥力指数的最小值，n为参与计算指标的个数，本研究中n为10。

1.5　相关性分析

为探明黄河三角洲盐碱地土壤肥力与化学性质之间的关系，对本研究所测定的10项土壤指标与SFI进行了Spearman相关性分析。通过量化SFI与各土壤指标（如pH、Salt、SOM）之间的相关关系，明确影响土壤肥力的关键要素。统计显著性水平设定为$P<0.05$。

1.6　数据处理

本研究采用Excel 2021对所获数据进行初步整理，使用SPSS 27.0对数据进行统计分析（双因素方差分析和3因素重复测量方差分析等），选用Origin 2024及R语言进行绘图。

2　结果与分析

2.1　冬小麦土壤化学性质

2.1.1　冬小麦土壤pH和含盐量　　土壤盐分水平、生育期对冬小麦土壤pH和含盐量具有显著影响（$P<0.05$），夏季覆盖作物类型、土壤盐分水平与夏季覆盖作物类型的交互作用、土壤盐分水平与生育期的交互作用、夏季覆盖作物类型与生育期的交互作用以及三者交互作用对土壤pH和含盐量均未表现出显著影响（$P>0.05$，表2）。

SW、HW-S和MW-S处理均在冬小麦返青期时土壤pH最高，成熟期与返青期相比显著下降（图2）。MW处理返青期pH中度盐分显著高于轻度盐分，HW处理在成熟期的pH中度盐分显著高于轻度盐分，其余处理在各生育期盐分之间无显著差异。轻度盐分下，HW、SW、MW处理冬小麦返青期的土壤含盐量均为3个生育期最低值。中度盐分下，HW-S和MW-S处理在播种期含盐量最高，返青期显著下降，SW-S处理在各生育期之间则无显著差异。3种轮作方式冬小麦返青期土壤含盐量在中度盐分显著高于轻度盐分，播种期和成熟期均无显著差异。

表2　不同盐分下各处理冬小麦的土壤pH、含盐量、速效养分方差分析

Table 2　Variance analysis of soil pH, salt content and available nutrients in each treatment of winter wheat under different salt levels

因子 Factors	pH		含盐量 Salt content		铵态氮 Ammonium nitrogen		硝态氮 Nitrate nitrogen		速效磷 Available phosphorus		速效钾 Available potassium	
	F 值 *F* value	*P* 值 *P* value	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
土壤盐分水平 Soil salinity level（SS）	13.799	0.001**	26.311	<0.001**	0.058	0.811	1.803	0.186	0.436	0.512	0.711	0.403
夏季覆盖作物类型 Types of summer cover crops（TC）	0.555	0.578	0.847	0.435	7.485	0.001**	18.899	<0.001**	4.644	0.014*	5.213	0.009**
生育期 Growth period（P）	20.149	0.008**	8.713	0.035*	141.668	<0.001**	16.722	0.011*	97.337	<0.001**	1.601	0.308
SS×TC	0.333	0.719	0.081	0.923	0.070	0.932	3.737	0.031*	3.447	0.040*	5.886	0.005**
SS×P	0.129	0.882	6.205	0.059	0.222	0.810	40.485	0.002**	34.029	0.003**	1.596	0.309
TC×P	0.382	0.815	2.278	0.150	216.909	<0.001**	3.398	0.066	73.591	<0.001**	1.030	0.448
SS×TC×P	0.886	0.472	2.128	0.169	1.747	0.307	22.187	<0.001**	1.464	0.299	0.747	0.586

注：土壤盐分水平、夏季覆盖作物类型、土壤盐分水平×夏季覆盖作物类型为双因素方差分析，其余为3因素重复测量方差分析，*表示$P<0.05$，**表示$P<0.01$，下同。Soil salinity level, types of summer cover crops, and soil salinity level×types of summer cover crops are analyzed by two-factor analysis of variance, while the rest are analyzed by three-factor repeated measures analysis of variance, * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$, the same below.

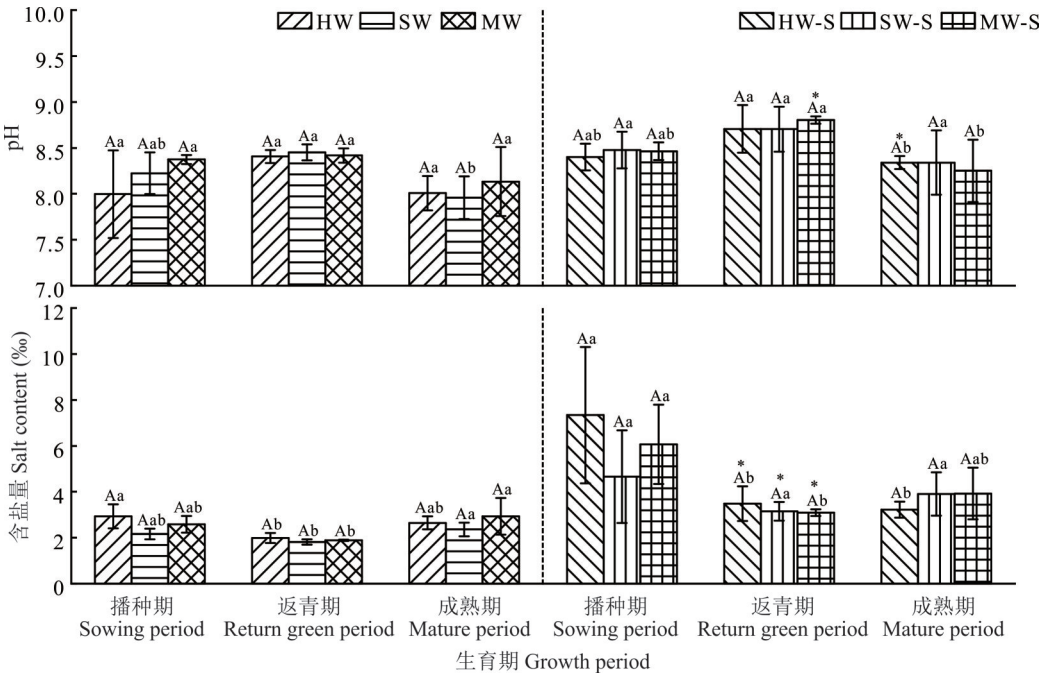


图2 不同盐分下各处理冬小麦的土壤pH、含盐量

Fig. 2 Soil pH and salinity of winter wheat under different salinity levels for each treatment

不同大写字母表示相同盐分同一时期下不同覆盖作物土壤指标差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一盐分相同覆盖作物下各生育期之间土壤指标的差异显著($P<0.05$);*表示相同覆盖作物同一时期下不同盐分间土壤指标差异显著($P<0.05$),下同。Different capital letters indicate significant differences in soil indicators of different cover crops under the same salt content and period at $P<0.05$ level; Different lowercase letters indicate significant differences in soil indicators among the growth period under the same salt content and cover crop at $P<0.05$ level; * indicates significant differences in soil indicators between salinity levels for the same cover crop among the growth period at $P<0.05$ level, the same below.

2.1.2 冬小麦的土壤速效养分 土壤盐分水平对冬小麦土壤的速效养分(铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾)未表现出显著影响($P>0.05$),夏季覆盖作物类型对土壤速效养分均具有显著影响($P<0.05$),生育期对土壤铵态氮、硝态氮、速效磷含量具有显著影响($P<0.05$),土壤盐分水平与夏季覆盖作物类型的交互作用对冬小麦土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量具有显著影响($P<0.05$),土壤盐分水平与生育期的交互作用对土壤硝态氮和速效磷含量具有极显著影响($P<0.01$),夏季覆盖作物类型与生育期的交互作用对土壤铵态氮和速效磷含量具有极显著影响($P<0.01$),土壤盐分水平、夏季覆盖作物类型和生育期三者的交互作用仅对土壤硝态氮含量具有极显著影响($P<0.01$,表2)。

轻度盐分下,HW处理冬小麦在播种期的土壤NH_4^+-N含量在3种夏季覆盖作物轮作中最高,且显著高于同处理的返青期和成熟期(图3);中度盐分下,播种期的HW-S处理NH_4^+-N含量为3种轮作中最高,成熟期MW-S处理的NH_4^+-N含量显著高于SW-S处理。MW-S处理的NH_4^+-N含量则从播种期到成熟期逐步升高。轻度盐分下,播种期的土壤NO_3^--N含量在HW处理最高,其次为SW处理,MW处理最低;返青期NO_3^--N含量在HW和SW处理显著高于MW处理,成熟期仅HW处理维持较高水平。HW处理的NO_3^--N含量成熟期显著高于返青期;SW处理的NO_3^--N含量在播种期和返青期维持较高水平,成熟期显著下降;MW处理的NO_3^--N含量先升高后下降,在返青期出现峰值。中度盐分下,不同夏季覆盖作物轮作中返青期时HW-S处理的NO_3^--N含量最高;HW-S和SW-S处理在返青期的NO_3^--N含量显著高于播种期,成熟期介于两者之间且差异不显著。HW处理在播种期和成熟期的NO_3^--N含量轻度盐分显著高于中度盐分;HW-S返青期、SW-S成熟期、MW-S播种期和成熟期的NO_3^--N含量表现为中度盐分显著高于轻度盐分。轻度盐分下,HW处理在播种期和返青期的AP含量均显著高于MW处理;各处理成熟期的AP含量显著高于播种期。中度盐分下,播种期时HW-S和SW-S处理的AP含量显著高于MW-S处理,且返青期和成熟期时SW-S处理的AP含量均为最高,MW-S处理的成熟期AP含量显著高于播种期,与返青期差异不显著。HW成熟期的AP含量在轻度盐分显著高于中度盐分,SW-S播种期和

返青期及MW-S播种期的AP含量在中度盐分下更高。轻度盐分下,不同夏季覆盖作物轮作中返青期时SW处理的AK含量最高,成熟期SW处理的AK含量显著高于MW处理,与HW处理差异不显著。中度盐分下,3种轮作方式、3个生育期之间差异均不显著。MW处理返青期的AK含量为中度盐分显著高于轻度盐分。

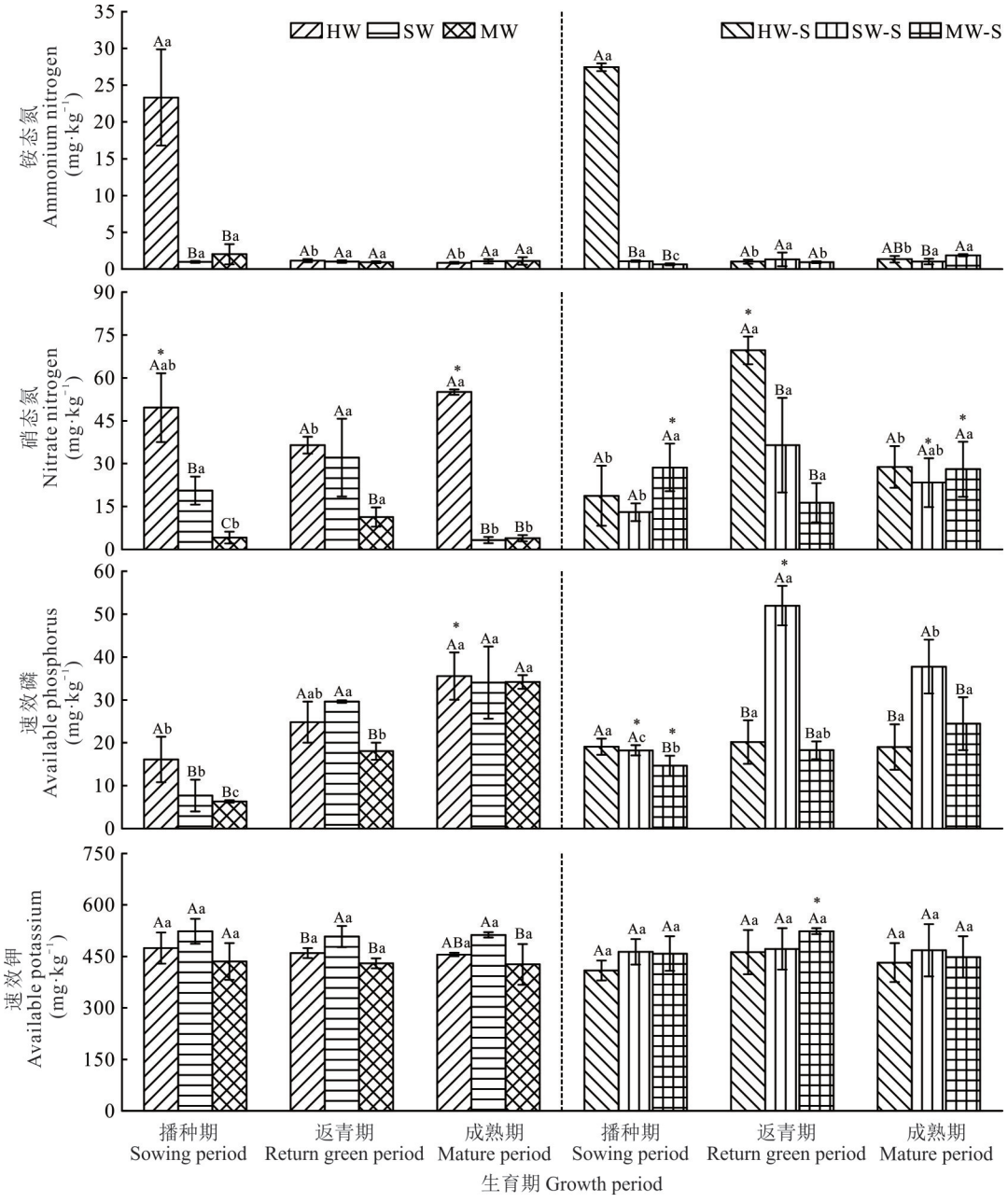


图3　不同盐分下各处理冬小麦的土壤速效养分含量

Fig. 3　Soil available nutrient contents in winter wheat under different salinity levels for each treatment

2.1.3　冬小麦的土壤全量养分　　土壤盐分水平和夏季覆盖作物类型仅对冬小麦土壤TP含量具有显著影响($P<0.05$),对TN和TK含量未表现出显著影响($P>0.05$)。生育期对冬小麦土壤TN和TK含量具有极显著影响($P<0.01$),对TP含量未表现出显著影响($P>0.05$)。土壤盐分水平与夏季覆盖作物类型的交互作用、土壤盐分水平与生育期的交互作用对土壤全量养分含量未表现出显著影响($P>0.05$),夏季覆盖作物类型与生育期的交互作用仅对土壤TP含量具有显著影响($P<0.05$),土壤盐分水平、夏季覆盖作物类型、生育期三者的交互作用对土壤全量养分均未表现出显著影响($P>0.05$,表3)。

表3 不同盐分下各处理冬小麦的土壤全量养分、有机质、土壤肥力指数方差分析

Table 3 Variance analysis of soil total nutrients, organic matter and soil fertility index of winter wheat under different salt levels in each treatment

因子 Factors	全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全钾 Total potassium		土壤有机质 Soil organic matter		土壤肥力指数 Soil fertility index	
	*F*值 *F* value	*P*值 *P* value	*F*值 *F* value	*P*值 *P* value	*F*值 *F* value	*P*值 *P* value	*F*值 *F* value	*P*值 *P* value	*F*值 *F* value	*P*值 *P* value
土壤盐分水平 Soil salinity level (SS)	0.222	0.640	4.664	0.036*	1.171	0.285	0.482	0.492	3.560	0.067
夏季覆盖作物类型 Types of summer cover crops (TC)	0.595	0.556	4.093	0.023*	0.862	0.429	2.720	0.079	29.897	<0.001**
生育期 Growth period (P)	148.607	<0.001**	2.725	0.179	30.551	0.004**	0.566	0.573	23.487	<0.001**
SS×TC	0.331	0.720	1.196	0.311	0.014	0.986	0.145	0.866	11.063	<0.001**
SS×P	1.457	0.335	4.862	0.085	2.437	0.203	0.114	0.893	3.987	0.027*
TC×P	0.031	0.983	5.165	0.024*	1.763	0.281	0.092	0.984	8.470	<0.001**
SS×TC×P	0.477	0.627	1.349	0.332	0.258	0.868	0.073	0.990	2.053	0.107

轻度盐分下,同生育期各处理冬小麦的土壤TN含量差异不显著;SW和MW处理播种期的TN含量最低,HW处理的TN含量在生育期之间差异不显著(图4)。中度盐分下,同生育期各处理间土壤的TN含量差异不显著;3种轮作方式均在播种期TN含量最低。3种夏季覆盖作物类型、3个生育期的TN含量在轻、中度盐分之间均

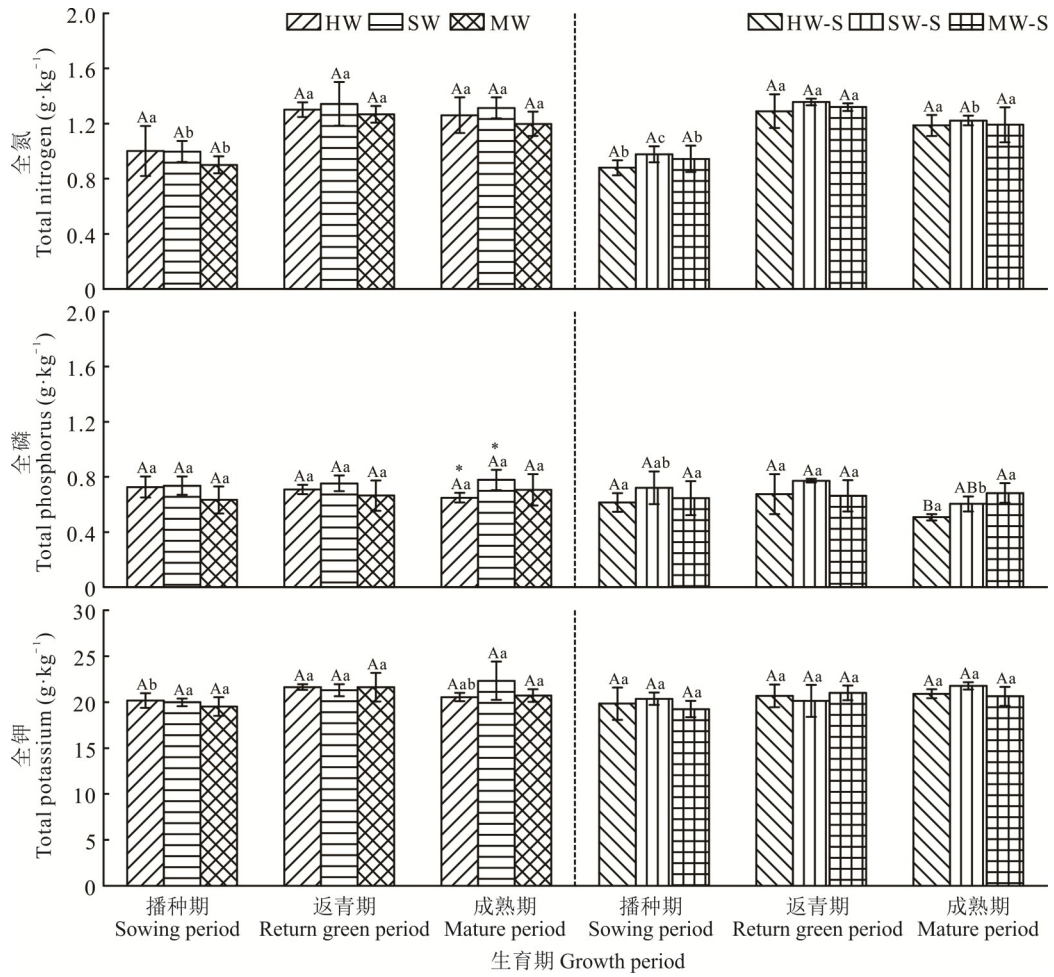


图4 不同盐分下各处理冬小麦的土壤全量养分含量

Fig. 4 Soil total nutrient contents during the winter wheat under different salinity levels for each treatment

没有显著差异。轻度盐分下，3个生育期夏季覆盖作物之间的TP含量差异不显著；3种夏季覆盖作物各生育期之间的TP含量差异不显著。中度盐分下，成熟期时MW-S处理的TP含量显著高于HW-S，SW-S处理介于两者之间，且差异不显著；SW-S处理的TP含量在返青期显著高于成熟期，与播种期差异不显著。HW和SW处理成熟期的TP含量表现为轻度盐分显著高于中度盐分。轻度盐分下，同生育期各处理冬小麦的土壤TK含量差异不显著，HW处理的TK含量在返青期显著高于播种期，与成熟期差异不显著。中度盐分下，3个生育期不同夏季覆盖作物之间的TK含量差异不显著；3种夏季覆盖作物各生育期之间的TK含量差异不显著。

2.1.4　冬小麦的土壤有机质　　土壤盐分水平、夏季覆盖作物类型和生育期以及两两之间的交互作用和三者之间的交互作用对冬小麦的SOM含量均未表现出显著影响（$P>0.05$，表3）。

轻度和中度盐分下，3个生育期夏季覆盖作物类型之间的SOM含量差异不显著；3种夏季覆盖作物类型各生育期之间的SOM含量差异不显著。3种夏季覆盖作物类型、3个生育期的SOM含量在轻、中度盐分之间均没有显著差异（图5）。

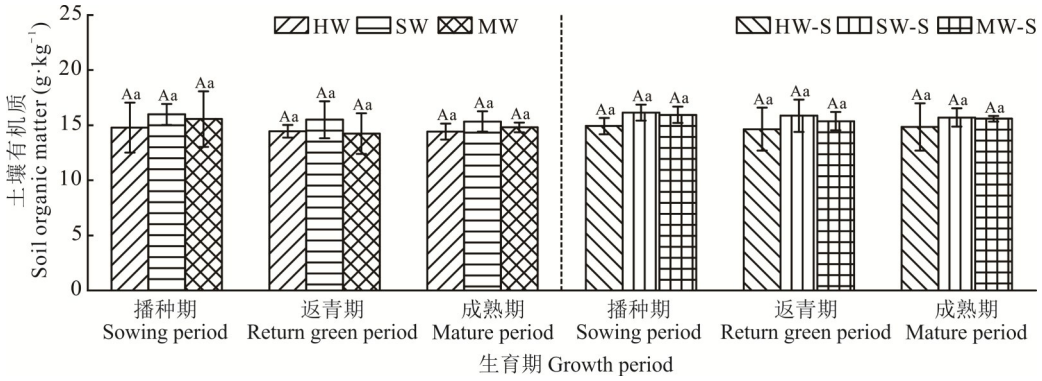


图5　不同盐分下各处理冬小麦土壤有机质含量

Fig. 5　Soil organic matter contents during the winter wheat under different salinity levels for each treatment

2.2　冬小麦的土壤肥力指数

夏季覆盖作物类型和生育期以及两者的交互作用、土壤盐分水平和夏季覆盖作物类型的交互作用、土壤盐分水平和生育期的交互作用对冬小麦的土壤肥力指数具有显著或极显著影响（$P<0.05$，$P<0.01$），土壤盐分水平以及三者的交互作用对冬小麦的土壤肥力指数未表现出显著影响（$P>0.05$，表3）。

轻度盐分下，3个时期HW处理的SFI显著高于MW处理，播种期和返青期SW处理的SFI显著高于MW处理；HW处理播种期的SFI显著高于成熟期，SW和MW处理返青期显著高于播种期和成熟期（图6）。中度盐分下，播种期HW-S处理的SFI显著高于MW-S处理，SW-S处理介于两者之间且差异不显著，其余时期各处理之间无显著差异；MW-S处理成熟期和返青期的SFI显著高于播种期。HW处理播种期的SFI表现为轻度盐分显著高于中度盐分，MW-S处理成熟期的SFI为中度盐分显著高于轻度盐分。

2.3　土壤肥力指数与化学性质的相关性分析

如图7所示，SFI与AP（$R=0.294$）、NH_4^+-N（$R=0.371$）、NO_3^--N（$R=0.607$）、TN（$R=0.495$）、TP（$R=0.286$）、TK（$R=0.303$）显著正相关（$P<0.05$），其中除与NO_3^--N为强相关（$R>0.5$）以外，其余均为弱相关（$R<0.5$）。SFI与Salt（$R=-0.308$）显著负相关（$P<0.05$）。上述结果表明，土壤综合肥力的提升与土壤氮库含量（TN）和速效氮供应能力（NH_4^+-N、NO_3^--N）的增强密切相关，其中与硝态氮含量的关联最为紧密。同时，土壤含盐量是制约土壤肥力提升的关键环境胁迫因子。各养分指标与土壤肥力指数（SFI）的正相关关系强弱顺序为：NO_3^--N＞TN＞NH_4^+-N＞TK＞AP＞TP。

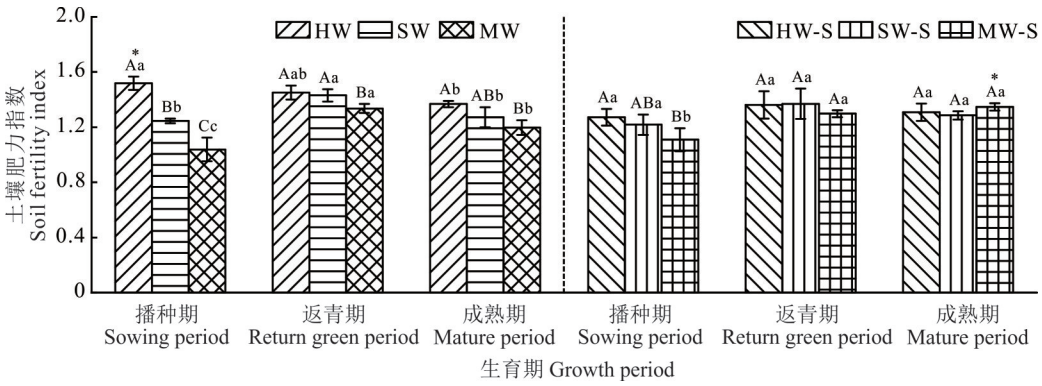


图6 不同盐分下各处理冬小麦的土壤肥力指数

Fig. 6 Soil fertility index of winter wheat under different salinity levels for each treatment

3 讨论

3.1 夏季覆盖种植对土壤化学性质的影响

覆盖作物种植可通过地面覆盖、减少土壤侵蚀、增强水分渗透、提高微生物活性,改善土壤物理、化学特性[28-29]。土壤盐分水平对冬小麦土壤pH、含盐量、全磷有显著影响。本试验通过人工调盐将轻度和中度盐分小区的土壤盐分分别调控在2‰和4‰左右,但黄河三角洲盐碱地土壤盐分具有季节性动态。雨季或灌溉有利于盐分向下淋洗,使表层盐分下降[30];而秋季降水减少、蒸发增强,浅层地下水毛管上升和表层蒸发会驱动盐分向表土聚集[31],造成土壤盐分升高。本研究中,轻度和中度盐分处理在冬小麦播种期表层土壤盐分均较初始土样有所提高,中度盐分处理土壤盐分含量较高,毛管上升和表聚现象更为显著。高丹草—冬小麦、田菁—冬小麦轮作在中度盐分下返青期和成熟期土壤pH高于轻度盐分,这可能是由于盐分胁迫抑制了高丹草和田菁的生长及其还田后的有机物料分解,土壤中低分子量有机酸含量随之减少,酸解和络合作用减弱,土壤pH升高[32]。本研究中,夏季覆盖作物类型对冬小麦土壤速效养分含量影响显著。在轻、中度盐分土壤中,高丹草—冬小麦轮作在冬小麦播种期均呈现出更高的NH_4^+-N、NO_3^--N、AP含量,可能源于高丹草在刈割后补肥,施肥带来的速效养分在小麦播种前未被高丹草所完全吸收利用,同时种植高丹草也可以提高土壤养分[33]。在轻度盐分土壤中,田菁—冬小麦轮作在冬小麦播种期和返青期NO_3^--N含量高于夏玉米—冬小麦轮作,可能是种植豆科覆盖作物,后续作物可获得额外的生物固氮量[34],且豆科覆盖作物对减少NO_3^--N淋溶和增加矿质氮能力优于禾本科覆盖作物[35]。在中度盐分土壤中,田菁—冬小麦轮作在冬小麦返青期和播种期土壤AP含量高于高丹草—冬小麦和夏玉米—冬小麦,这可能是由于豆科覆盖作物相较于禾本科作物植株中磷含量更高[36],在还田腐解后期更有利于增加酶可利用的有机磷含量以及根茎微生物丰度和活性[37]。在轻度盐分土壤中,田菁—冬小麦轮作土壤AK含量提高,与郭耀东等[38]的研究结果一致。生育期对冬小麦土壤pH、含盐量、铵态氮、

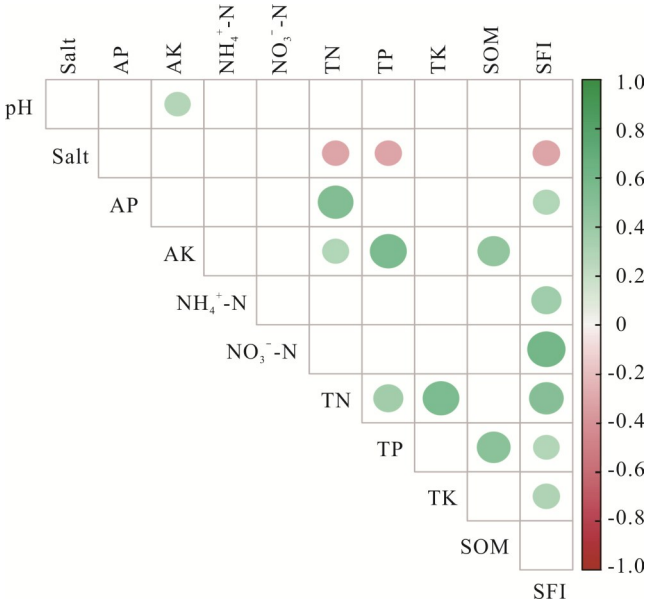


图7 土壤肥力指数与化学性质的相关性

Fig. 7 The correlation between soil fertility index and chemical properties

Salt:含盐量 Salt content;SOM:土壤有机质 Soil organic matter;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;TK:全钾 Total potassium;NH_4^+-N:铵态氮 Ammonium nitrogen;NO_3^--N:硝态氮 Nitrate nitrogen;AP:速效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium;SFI:土壤肥力指数 Soil fertility index. 圆形:$P<0.05$,圆圈越大,P值越小。Circles: $P<0.05$, the larger the circle, the smaller the P value.

硝态氮、速效磷、全氮和全钾均有显著影响。不同生育期pH和含盐量差异受到地下水位、降水量、农田灌溉以及土壤中低分子量有机酸含量变化的影响[32,39]。在中度盐分土壤中，夏季种植高丹草，后茬冬小麦返青期土壤NO_3^--N含量高于播种期；在轻度盐分土壤中，后茬冬小麦成熟期的土壤NO_3^--N含量显著高于返青期，这可能与成熟期地温提升，土壤微生物量增加，高丹草庞大的根系生物量加速腐解，进而增加了土壤含氮量有关[40]。土壤全量养分（TN、TP、TK）是衡量土壤基础肥力的关键指标，其含量相对稳定，短期内不易产生巨大变化。本研究中盐分水平、夏季覆盖作物类型仅对后茬小麦表层土壤TP具有显著影响，而对TN、TK无显著影响。高丹草－冬小麦、田菁－冬小麦轮作在轻度盐分下成熟期土壤TP含量显著高于中度盐分，其原因可能是土壤微生物活性和土壤碱性磷酸酶活性所受抑制较小[41-42]，从而使高丹草和田菁残体中有机磷高效分解矿化并进入到土壤磷库中。

3.2　夏季覆盖种植对土壤肥力指数的影响

土壤盐分和夏季覆盖作物类型对后茬冬小麦土壤肥力指数均具有影响。其中，夏玉米－冬小麦轮作在冬小麦成熟期，中度盐分土壤的SFI高于轻度盐分土壤，这可能是由于盐分胁迫导致小麦生长受到抑制[43]，引发冬小麦对土壤养分吸收量减少，而土壤中残留了相对较高的养分含量，造成了中度盐分土壤的SFI相对较高。然而，这并不等同于土壤肥力的提升，因为这些养分可能未被作物有效利用。在轻度盐分土壤中，冬小麦播种期和返青期，高丹草－冬小麦和田菁－冬小麦的SFI显著高于玉米－冬小麦，可能与覆盖作物类型和施肥制度有关。一方面，田菁通过生物固氮并以翻压方式还田，其低C/N残体分解矿化[44]，显著提高了后茬作物土壤有机碳、全氮和有效磷含量[45]；另一方面，高丹草在第一次刈割后补施化肥，显著促进根系生长[46]，同时部分养分在高丹草生长期未被完全利用而保留于土壤中，提升了后茬冬小麦的土壤养分供应能力。在轻度盐分土壤中，夏季种植田菁和玉米，后茬冬小麦返青期SFI显著高于播种期和成熟期，这可能与气温和土壤水分有关。在冬小麦返青期，秸秆覆盖可提高表层土壤蓄水量和温度[47]，加快其分解和矿化，提高土壤中养分含量。

在相同盐分水平下，不同轮作方式的土壤肥力具有差异，这与作物类型、施肥制度和秸秆/绿肥还田量等多种因素有关。不同作物类型的秸秆和绿肥还田量具有差异，导致有机碳、全氮、有效磷和速效钾等输入不同，造成了不同轮作方式土壤肥力的差异[48-49]。施肥制度同样会造成土壤肥力差异，长期定位研究表明持续平衡施肥可显著提高土壤速效养分含量并在一定程度上减缓土壤肥力衰退[50]，且不同施肥制度会显著影响土壤微生物群落及其代谢活性，改变土壤有机质分解和养分转化过程[51]。因此，相同盐分农田下，土壤肥力的改变是受整个轮作方式（不同的作物类型、农艺管理方式）综合作用的结果。然而，土壤盐分等理化指标的差异同样受多种因素影响。化肥带来的可溶性盐分输入相对有限，作物耗水、根系分布以及有机物还田均会对水盐运移过程产生较大影响[52]。在当前试验设计条件下，难以确定各因素对土壤养分、SFI及盐分变化的影响程度，可在后续试验中进一步分析。

3.3　土壤肥力与化学性质的相关性

本研究中，土壤肥力指数（SFI）与速效磷、全磷、铵态氮、硝态氮、全氮、全钾显著正相关，与丁馨茹等[27]的研究结果一致，而其与土壤含盐量呈显著负相关。为提升盐碱农田土壤肥力，可通过添加生物炭、秸秆还田、覆盖种植以提高土壤氮、磷、钾等养分含量[53-54]。土壤肥力指数与土壤含盐量显著负相关。高盐分通过渗透胁迫和离子毒性，不仅直接抑制作物生长，更会破坏土壤结构、抑制微生物活性，从而导致养分有效性下降。有研究发现盐碱土壤中Na^+过量会扰乱土壤团聚体，妨碍养分的有效性和吸收[55]。现阶段滨海盐碱地降盐措施主要包括暗管排盐、地表覆盖、使用化学土壤改良剂、种植耐盐碱植物等[56]。

4　结论

在盐碱农田中，土壤盐分水平和夏季覆盖作物类型会影响后茬冬小麦的土壤肥力。在轻度盐分土壤中，与传统夏玉米－冬小麦轮作相比，高丹草－冬小麦和田菁－冬小麦轮作后茬冬小麦土壤肥力指数在播种期分别提高了46.24%和19.98%，返青期分别提高了8.61%和7.12%，成熟期高丹草－冬小麦提高了14.29%。在中度盐分土壤中，高丹草－冬小麦轮作后茬冬小麦播种期土壤肥力指数与夏玉米－冬小麦轮作相比显著增加了

14.67%。土壤肥力指数与土壤速效磷、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷和全钾呈显著正相关关系,而与土壤盐分呈显著负相关关系。在轻度盐碱农田中,夏季种植高丹草或田菁通过提高盐碱地中养分供给能力,提升了后茬冬小麦的土壤肥力。因此,高丹草和田菁可替代传统夏玉米成为盐碱地改良的夏季覆盖作物。

参考文献 References:

[1] Yang J S, Yao R J, Wang X P, *et al*. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10−27.
杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望. 土壤学报, 2022, 59(1): 10−27.

[2] Cui Q, Xia J B, Yang H J, *et al*. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China. Science of the Total Environment, 2021, 756(7): 143801.

[3] Cui L Q, Liu Y M, Yan J L, *et al*. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth. Ecological Engineering, 2022, 179(6): 106594.

[4] Huang X C, Shi X J, Li Y, *et al*. Effect of the inherent soil productivity on high, stable and sustainable yield of grain and oil crops in yellow soil region. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(8): 1476−1485.
黄兴成, 石孝均, 李渝, 等. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1476−1485.

[5] Zou H Q, Li D J, Ren K Y, *et al*. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility. Frontiers in Plant Science, 2024, 15(1): 1349180.

[6] Liu Z J, Yuan X H, Zhang Z X, *et al*. Revisiting potassium-induced impacts on crop production and soil fertility based on thirty-three Chinese long-term experiments. Field Crops Research, 2025, 322(3): 109732.

[7] Wang L Q, Ma D L, Liu H Y, *et al*. Soil fertility differences due to tillage methods modulate maize yield formation at different planting densities. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2437.

[8] Boselli R, Fiorini A, Santelli S, *et al*. Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems. Field Crops Research, 2020, 255(11): 107871.

[9] Zheng Y F, Cao X W, Zhou Y A, *et al*. Effect of planting salt-tolerant legumes on coastal saline soil nutrient availability and microbial communities. Journal of Environmental Management, 2023, 345(21): 11857.

[10] Nouri A, Lukas S, Singh S, *et al*. When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. Global Change Biology, 2022, 28(15): 4736−4749.

[11] Jian J S, Du X, Reiter M S, *et al*. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 143(4): 107735.

[12] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, *et al*. Legume cover crops provide nitrogen to corn during a three-year transition to organic cropping. Agronomy Journal, 2019, 111(6): 3253−3264.

[13] Ma J Y, Wang T, Liu X L, *et al*. Meta-analysis of yield effects and influencing factors of cover crops on main grain crops in China. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(10): 1871−1880.
马佳玉, 王涛, 刘小利, 等. 覆盖作物对我国粮食作物的产量效应及影响因素的Meta分析. 中国农业科学, 2023, 56(10): 1871−1880.

[14] Liao H, Kuang S J, Zhang Q, *et al*. Impacts of continuous green manure combined with chemical fertilizer reduction on growth, nutrient accumulation and yield of maize in yellow soil area of Guizhou Province. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(2): 98−104.
廖恒, 况胜剑, 张钦, 等. 贵州黄壤区连续翻压绿肥配合化肥减量对玉米生长、养分积累和产量的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(2): 98−104.

[15] Nielsen D C, Lyon D J, Higgins R K, *et al*. Cover crop effect on subsequent wheat yield in the central great plains. Agronomy Journal, 2016, 108(1): 243−256.

[16] Jian S L, Li S X, Liu S Q, *et al*. Research advances of cover crops and their important roles. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(1): 1−14.
蹇述莲, 李书鑫, 刘胜群, 等. 覆盖作物及其作用的研究进展. 作物学报, 2022, 48(1): 1−14.

[17] Shang S Q, Zhang X Y, Wang D W, *et al*. Effects of tillage depth and planting density on the photosynthetic characteristics and yield of peanut in coastal saline alkaline land. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(12):

86－94.
尚书旗，张茜雅，王东伟，等. 耕作深度与种植密度对滨海盐碱地花生光合特性及产量的影响. 农业工程学报，2025，41(12)：86－94.

[18] Ouyang Z，Wang H S，Lai J B，*et al*. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River Delta. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2020，35(2)：145－153.
欧阳竹，王竑晟，来剑斌，等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式. 中国科学院院刊，2020，35(2)：145－153.

[19] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (the third edition). Beijing：China Agriculture Press，2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京：中国农业出版社，2000.

[20] Huang X C，Li Y，Bai Y J，*et al*. Evolution of yellow soil fertility under long-term fertilization and response of corp yield. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2018，24(6)：1484－1491.
黄兴成，李渝，白怡婧，等. 长期不同施肥下黄壤综合肥力演变及作物产量响应. 植物营养与肥料学报，2018，24(6)：1484－1491.

[21] Tomczyk P，Wdowczyk A，Wiatkowska B，*et al*. Fertility and quality of arable soils in Poland：spatial-temporal analysis of long-term monitoring. Ecological Indicators，2024，166(9)：112375.

[22] Jian Z J，Ni Y Y，Xu J，*et al*. Soil fertility in the *Pinus massoniana* forests of China. Acta Ecologica Sinica，2021，41(13)：5279－5288.
简尊吉，倪妍妍，徐瑾，等. 中国马尾松林土壤肥力特征. 生态学报，2021，41(13)：5279－5288.

[23] Gao Y，Zhang Y X，Bu A A，*et al*. Evaluation of fertility quality in typical “non-grain” cultivated soils of Zhejiang Province of China based on the improved Nemerow method. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2025，37(8)：1755－1765.
高扬，张瑜昕，卜爱爱，等. 基于改进的内梅罗综合指数法的浙江省典型“非粮化”土壤肥力质量评价. 浙江农业学报，2025，37(8)：1755－1765.

[24] Bao Y X，Xu M G，Lv F T，*et al*. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization. Scientia Agricultura Sinica，2012，45(20)：4197－4204.
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. 中国农业科学，2012，45(20)：4197－4204.

[25] Chen X J，Zhao Y N，Chai G Q，*et al*. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2016，32(S1)：139－144.
陈轩敬，赵亚南，柴冠群，等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应. 农业工程学报，2016，32(S1)：139－144.

[26] Zhang Q，Liu X H，Ma X C，*et al*. Soil fertility assessment and environmental risk analysis of vegetable fields along the Yangtze River in Jiangsu Province. Jiangsu Agricultural Sciences，2024，52(10)：234－240.
张琦，刘新红，马啸驰，等. 江苏沿江地区菜地土壤肥力评价及环境风险分析. 江苏农业科学，2024，52(10)：234－240.

[27] Ding X R，Yan N Z，Wang Z F，*et al*. Effects of four amendments on fertility and labile organic carbon fractions of acid purple soil. Environmental Science，2024，45(3)：1655－1664.
丁馨茹，严宁珍，王子芳，等. 4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响. 环境科学，2024，45(3)：1655－1664.

[28] Tadiello T，Potenza E，Marino P，*et al*. Growth，weed control，and nitrogen uptake of winter-killed cover crops，and their effects on maize in conservation agriculture. Agronomy for Sustainable Development，2022，42(2)：3－15.

[29] Taskin E，Boselli R，Fiorini A，*et al*. Combined impact of no-till and cover crops with or without short-term water stress as revealed by physicochemical and microbiological indicators. Biology，2021，10(1)：2－19.

[30] Yin X W，Feng Q，Liu W，*et al*. Assessment and mechanism analysis of plant salt tolerance regulates soil moisture dynamics and controls root zone salinity and sodicity in seasonally irrigated agroecosystems. Journal of Hydrology，2023，617(2)：129138.

[31] Wang D Y，Zheng J Y，Tan Y Y，*et al*. Seasonal climate drives soil salinity dynamics through vegetation and water regulation. Resources Environment and Sustainability，2025，22(4)：100266.

[32] Yang X，Lu Y Q，Ma L L，*et al*. Effects of low-molecular-weight organic acids on leachate and soil properties of typical soils under leaching condition in three gorge reservior areas. Bulletin of Soil and Water Conservation，2016，36(4)：175－181.
杨茜，卢越琴，马玲莉，等. 淋溶条件下低分子量有机酸对淋出液及三峡库区典型土壤性质的影响. 水土保持通报，2016，36(4)：175－181.

[33] Qin Z Y，Wu J B，Zheng H X，*et al*. Improvement effects of different feed crops on soda saline-alkali soil. Soils，2023，55(5)：1088－1096.

秦子元, 邬佳宾, 郑和祥, 等. 不同饲料作物对苏打盐碱土改良效应研究. 土壤, 2023, 55(5): 1088－1096.

[34] Fiorini A, Maris S C, Abalos D, *et al*. Combining no-till with rye cover crop mitigates nitrous oxide emissions without decreasing yield. Soil & Tillage Research, 2020, 196(1): 104442.

[35] Gabriel J L, Muñoz-Carpena R, Quemada M. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 155(10): 50－61.

[36] Hallama M, Pekrun C, Lambers H, *et al*. Hidden miners－the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. Plant and Soil, 2019, 434(1/2): 7－45.

[37] Hallama M, Pekrun C, Mayer-Gruner P, *et al*. The role of microbes in the increase of organic phosphorus availability in the rhizosheath of cover crops. Plant and Soil, 2022, 476(7): 353－373.

[38] Guo Y D, Cheng M, Zhao X F, *et al*. Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline-alkali soils. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 856－864.
郭耀东, 程曼, 赵秀峰, 等. 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 856－864.

[39] Lv Z Z, Yang J S, Liu G M, *et al*. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1377－1385.
吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究. 土壤学报, 2017, 54(6): 1377－1385.

[40] Acosta-Martínez V, Cotton J. Lasting effects of soil health improvements with management changes in cotton-based cropping systems in a sandy soil. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(5): 533－546.

[41] Maltas A S, Tavali I E, Uz I, *et al*. Monitoring the effects of pH and EC regulated drip fertigation on microbial dynamics of calcareous soil in tomato cultivation under greenhouse conditions in a Mediterranean climate. Scientia Horticulturae, 2022, 306(16): 111448.

[42] Xie W P, Yang J S, Gao S, *et al*. The effect and influence mechanism of soil salinity on phosphorus availability in coastal salt-affected soils. Water, 2022, 14(18): 2－15.

[43] Yang Y Q, Guo Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. New Phytologist, 2018, 217(2): 523－539.

[44] Lu Y, Jin S B, Jia L, *et al*. Green manuring effect on changes of soil nitrogen fractions, maize growth, and nutrient uptake. Agronomy, 2018, 8(11): 261.

[45] Adams A M, Gillespie A W, Dhillon G S, *et al*. Long-term effects of integrated soil fertility management practices on soil chemical properties in the Sahel. Geoderma, 2020, 366(10): 114207.

[46] Choi N, Choi M, Lee S, *et al*. Effects of ecotypes and reduced N fertilization on root growth and aboveground development of ratooning sorghum×sudangrass hybrids. Agronomy, 2024, 14(9): 2073.

[47] Hu Y J, Ma P H, Zhang B B, *et al*. Exploring optimal soil mulching for the wheat-maize cropping system in sub-humid drought-prone regions in China. Agricultural Water Management, 2019, 219(9): 59－71.

[48] Su X C, Sun L Y, Kang Y T, *et al*. Green manuring increases network complexity and deterministic assembly of diazotrophic community in a subtropical paddy soil. Applied Soil Ecology, 2025, 208(4): 105997.

[49] Sun L, He J Y, Qi P Y, *et al*. Multi-objective optimization of agronomic practices to balance soil fertility, water productivity, and economic returns in saline-alkali farmlands. Field Crops Research, 2025, 328(9): 109928.

[50] Liu Y R, Hou H Q, Lan X J, *et al*. Effects of long-term sustainable inorganic fertilization on rice productivity and fertility of quaternary red soil. Agronomy, 2024, 14(10): 2311.

[51] Ma T F, He X H, Chen S G, *et al*. Long-term organic-inorganic fertilization regimes alter bacterial and fungal communities and rice yields in paddy soil. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 809712.

[52] Yu D Q, Meng Y H. Spatial distribution of salt ions in surface soils in the south coast of Laizhou bay. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(8): 29－35.
于得芹, 蒙永辉. 莱州湾南岸地区表层土壤盐分离子分异规律. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 29－35.

[53] Wang D, Liu S, Hao L W, *et al*. Nine-year biochar history increases topsoil nitrogen stocks and reduces the refractory organic nitrogen fractions in deep soils. Journal of Soils and Sediments, 2025, 25(6): 1802－1815.

[54] Wang J K, Gao F S, Zhang K Y, *et al*. Effects of returning gramineous green manure to cotton field on soil carbon and nitrogen in saline alkali soil. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(3): 396－404.
王敬宽, 高枫舒, 张楷悦, 等. 禾本科绿肥还田对盐碱地棉田土壤碳氮及微生物量碳氮的影响. 中国生态农业学报, 2023,

31(3): 396－404.

[**55**] Jin F, Piao J L, Miao S H, *et al*. Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: based on a 6-year field experiment. Biochar, 2024, 6(1): 7972.

[**56**] 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. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(2): 1－13.
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. 中国草地学报, 2024, 46(2): 1－13.