

DOI:10.11686/cyxb2024364

http://cyxb.magtech.com.cn

张邦彦, 谢小伟, 张朝辉, 等. 有机-无机改良物料对盐碱地土壤质量及湖南稷子产量的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 15-29.

ZHANG Bang-yan, XIE Xiao-wei, ZHANG Zhao-hui, et al. Effect of organic-inorganic amendments on the quality of saline-alkaline soil and yield of *Echinochloa frumentacea*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 15-29.

有机-无机改良物料对盐碱地土壤质量及湖南稷子产量的影响

张邦彦¹, 谢小伟¹, 张朝辉¹, 武晋民², 王彬^{2*}, 许兴¹

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021)

摘要:为探究有机-无机改良物料配施对盐碱土的改良培肥效果, 试验采用单因素拉丁方设计, 设置CK(不施土壤改良物料)、PM(磷石膏 22.5 t·hm⁻²+腐熟羊粪 15 t·hm⁻²)、CM(过磷酸钙 300 kg·hm⁻²+腐熟羊粪 15 t·hm⁻²)、PCM₁(磷石膏 22.5 t·hm⁻²+过磷酸钙 300 kg·hm⁻²+腐熟羊粪 15 t·hm⁻²)、PCM₂(磷石膏 30.0 t·hm⁻²+过磷酸钙 600 kg·hm⁻²+腐熟羊粪 30.0 t·hm⁻²)、PCM₃(磷石膏 30.0 t·hm⁻²+过磷酸钙 900 kg·hm⁻²+腐熟羊粪 30.0 t·hm⁻²) 6个处理, 研究了不同有机-无机改良物料配施对盐碱地土壤质量及湖南稷子产量的影响。结果表明, 不同有机-无机物料配施均降低了土壤pH、全盐(TDS)、容重, 提高了养分含量和>0.25 mm团聚体比例及稳定性, 其中处理PCM₂和PCM₃效果较好; 与CK相比, 土壤pH、全盐和容重较对照分别降低了2.40%、27.33%、16.17%和1.83%、17.42%、12.94%, 显著增加了0~40 cm土壤有机质(SOM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)含量; 平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm团聚体含量(R_{0.25})较对照分别提高了131.43%、164.07%、97.22%和78.58%、81.68%、57.41%, 出苗率和产量较对照分别提高了62.84%、50.07%和68.24%、47.76%。土壤团聚体稳定性与孔隙度、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾呈正相关关系, 而与容重、pH、全盐量呈负相关关系。此外, PCM₂和PCM₃处理通过调理盐碱指标(pH, TDS)和肥力水平(AN、AP、AK和SOM)来提高土壤质量, 而PCM₂处理在这两个方面的作用效果要优于PCM₃处理, 因而获得了最高干草产量。综合各有机-无机物料配施对盐碱地的改良培肥效果, 磷石膏(30.0 t·hm⁻²)+过磷酸钙(600 kg·hm⁻²)+腐熟羊粪(30.0 t·hm⁻²)处理较适合该区域。

关键词:盐碱土; 有机-无机改良物料; 团聚体; 土壤质量; 作物产量

Effect of organic-inorganic amendments on the quality of saline-alkaline soil and yield of *Echinochloa frumentacea*

ZHANG Bang-yan¹, XIE Xiao-wei¹, ZHANG Zhao-hui¹, WU Jin-min², WANG Bin^{2*}, XU Xing¹

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The aim of this study was to investigate the abilities of organic-inorganic amendments to improve and fertilize saline-alkaline soils. An experiment was conducted using a one-way Latin square design with the following treatments: CK (no soil amendment materials), PM [phosphogypsum (22.5 t·ha⁻¹) + well-decomposed goat manure (15 t·ha⁻¹)], CM [calcium superphosphate (300 kg·ha⁻¹) + well-decomposed goat manure (15 t·ha⁻¹)],

收稿日期: 2024-09-24; 改回日期: 2024-11-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900600)资助。

作者简介: 张邦彦(1996-), 男, 甘肃白银人, 在读博士。E-mail: bangyz@yeah.net

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 15809502973@163.com

PCM₁ [phosphogypsum (22.5 t·ha⁻¹) + calcium superphosphate (300 kg·ha⁻¹) + well-decomposed goat manure (15 t·ha⁻¹)], PCM₂ [phosphogypsum (30.0 t·ha⁻¹) + calcium superphosphate (600 kg·ha⁻¹) + well-decomposed goat manure (30.0 t·ha⁻¹)], and PCM₃ [phosphogypsum (30.0 t·ha⁻¹) + calcium superphosphate (900 kg·ha⁻¹) + well-decomposed goat manure (30.0 t·ha⁻¹)]. These six treatments were designed to study the effects of varying ratios of organic—inorganic amendment materials on the soil quality and the yield of *Echinochloa frumentacea* grown in saline—alkaline soil. The results indicate that organic and inorganic materials at varying ratios decreased soil pH, total dissolved salt (TDS), and bulk density, and increased soil nutrient contents and the proportion and stability of aggregates larger than 0.25 mm. Among the treatments, PCM₂ and PCM₃ had better effective. The soil pH, total salt, and bulk density were decreased by 2.40%, 27.33%, and 16.17%, respectively, in the PCM₂ treatment, and by 1.83%, 17.42%, and 12.94%, respectively, in the PCM₃ treatment, compared with CK. The soil organic matter (SOM), alkaline nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) contents in the 0—40 cm soil layer were significantly increased in the PCM₂ and PCM₃ treatments compared with CK. The mean weight, diameter, geometric mean diameter, and aggregates content of particles larger than 0.25 mm were increased by 131.43%, 164.07%, and 97.22%, respectively, in PCM₂, and by 78.58%, 81.68%, and 57.41%, respectively, in PCM₃, compared with CK. Additionally, the seedling emergence rate and yield were improved by 62.84% and 50.07%, respectively, in PCM₂, and by 68.24% and 47.76%, respectively, in PCM₃, compared with CK. Soil aggregate stability was positively correlated with porosity, SOM, AN, AP, and AK, and negatively correlated with bulk density, pH, and total salts. In addition, the PCM₂ and PCM₃ treatments enhanced soil quality by improving salinity indicators (pH, TDS) and fertility levels (AN, AP, AK, and SOM). The PCM₂ treatment was more effective than the PCM₃ treatment in both respects, resulting in the highest hay yield. After evaluating the effects of various ratios of organic and inorganic materials on the enhancement and fertilization of saline-alkaline land, the treatment PCM₂, comprising a combination of phosphogypsum (30.0 t·ha⁻¹), calcium superphosphate (600 kg·ha⁻¹), and decomposed goat manure (30.0 t·ha⁻¹) was found to be the most suitable soil amendment for this region.

Key words: saline soils; organic—inorganic modified materials; aggregates; soil quality; crop yield

盐碱化耕地是我国中低产田的主要类型,总面积约为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中具有农业潜力的有 $1.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$,广泛分布于中国东北、西北、黄河中上游的河套平原、华北及滨海地区^[1]。土壤盐碱化造成有机质含量低,土壤结构差,植物可利用养分失衡,严重地降低了作物生产力,威胁农业的可持续发展。作为重要的后备耕地资源,盐碱地的改良利用,是有效扩增农业耕地资源的重要手段,同时盐渍化土壤的改良和利用对促进土壤养分周转,提高作物生产力具有重要意义^[2]。宁夏银北平原河套灌区由于成土母质和较高的蒸降比等自然因素,以及黄河水灌溉和长期不合理的耕作措施等人为因素,存在大量的盐碱化土壤,约占其耕地面积的48.9%。“十四五”以来,致力于黄河流域生态保护和高质量发展,在黄河水资源用量限额的约束下,“压稻改旱”农业种植结构调整、盐碱地“资源化”利用,是自治区农业发展适应新形势的一项迫切任务。

施用土壤改良剂是一种重要盐碱土化学改良措施,以离子代换、酸碱中和为原理,改良见效速度快,能够有效改善盐碱土的理化性质,促进植物生长^[3]。钙基类材料(石膏、过磷酸钙等)是盐碱地改良常利用到的改良物料,众多研究表明,石膏施用在排盐降碱、提高作物产量等方面均具有显著的效果^[4-5]。而有机类材料(腐殖酸、农家肥等)对于提高盐碱化土壤缓冲性能、提升养分库容量有良好的效果^[6-7]。其中,石膏施用后溶解的Ca²⁺与土壤胶体Na⁺交换并淋洗,降低土壤胶体吸附的交换态钠^[7-8]。有机肥因具有强吸附能力、培肥地力、改良土壤团聚体等特点,近年来也被广泛应用于盐碱土壤改良。而有关过磷酸钙的研究较少,其一方面可以为土壤带来磷素营养,提高磷肥利用率,另一方面,过磷酸钙中的钙离子也可以与盐碱地中的钠离子发生交换,有效减少盐碱地的盐分含量^[9]。刘月等^[10]、张菁等^[11]在内蒙古河套灌区施用钙基型土壤改良剂,能显著降低土壤盐分、提高养分含量,短

期内能够实现土壤盐碱土壤改良、培肥和增产。薛远赛等^[9]在山东渤海湾盐碱地进行有机肥与过磷酸钙混施发现,过磷酸钙和有机肥混施提高了小麦(*Triticum aestivum*)的叶绿素含量及叶面积指数,促进了旗叶光合作用的进行,从而达到增产的效果。尽管磷石膏、过磷酸钙和有机肥在盐碱土改良方面发挥了一定的作用,但过量施用会增加土壤全盐量^[12]。因此,如何合理高效施用土壤改良剂已经成为人们关注的焦点。湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*)是一年生禾本科稗属牧草,耐盐性强,具有良好的经济和生态效益。早期研究主要集中在引种栽培利用方面,近些年的研究主要集中在盐碱地生物改良方面^[13]。万力生等^[14]研究表明,湖南稷子能够在含盐量为0.6%、pH为9.3的重度盐碱地上正常发芽和生长,且保苗率高达92%。也有研究发现,在弃耕盐碱荒地上种植湖南稷子2~3年后,土壤全盐含量、pH以及碱化度明显降低,土壤物理性状明显改善^[15]。

鉴于以往研究主要集中在单一改良物料对盐碱土的改良,而对多元化、复合型改良物料对土壤质量的改良效果研究报道较少。为此,本研究选择将常见的钙基化学调理材料和发酵有机物料进行不同配比,分析配施调控下土壤物理性质、养分含量和团聚体变化规律,探讨土壤指标之间的相互作用关系及土壤指标与湖南稷子产量之间的关系,利用土壤质量指数(soil quality index, SQI)揭示农田土壤环境因子与产量的定量关系,以确定合适的磷石膏、过磷酸钙和羊粪施用量,以期为宁夏银北平原盐碱地有机-无机物料配施下耐盐先锋植物湖南稷子农田土壤质量提升、盐碱地精准改良和产能提升提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县高庄乡(105°57'E, 38°36'N),海拔大约为1100 m,地势低洼,属中温带半干旱沙漠性气候,日照充足,温差大,蒸发强烈,年平均蒸发量1825 mm,年平均降水量173.2 mm,年均温2.8~16.0℃,年平均日照时数3008.6 h,平均霜冻期194.6 d,无霜期为171 d,试验地土壤基本特征如表1所示。

表1 试验地土壤基本特征

Table 1 Basic soil characteristics of the test site

土层 Soil layer (cm)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	pH	全盐 Total dissolved salt (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)
0~20	1.55	7.50	4.29	6.07	19.10	3.28	215.27
20~40	1.63	7.75	4.15	5.79	12.73	1.67	208.80

1.2 试验设计

2021年4月—2022年9月在研究区开展试验,采用单因素拉丁方设计,共设6个处理:对照(CK),不施土壤改良剂;处理PM,磷石膏(22.5 t·hm⁻²) + 腐熟羊粪(15 t·hm⁻²);处理CM,过磷酸钙(300 kg·hm⁻²) + 腐熟羊粪(15 t·hm⁻²);处理PCM₁,磷石膏(22.5 t·hm⁻²) + 过磷酸钙(300 kg·hm⁻²) + 腐熟羊粪(15 t·hm⁻²);处理PCM₂,磷石膏(30.0 t·hm⁻²) + 过磷酸钙(600 kg·hm⁻²) + 腐熟羊粪(30.0 t·hm⁻²);处理PCM₃,磷石膏(30.0 t·hm⁻²) + 过磷酸钙(900 kg·hm⁻²) + 腐熟羊粪(30.0 t·hm⁻²)。每个处理6次重复,共36个小区,每个小区24 m²(6 m×4 m),小区间过道1 m,保护行3 m宽。2020年11月上旬将各土壤改良剂按试验设计的配施比例混匀后均匀地撒施到小区内,然后旋耕使土壤与物料混匀,并进行冬灌(70 m³)。2021年4月18日播种湖南稷子,播量37.5 kg·hm⁻²,行距20 cm。改良物料对土壤改良效果具有长期性,2022年第2年试验在原来的试验地小区继续种植湖南稷子,不做土壤处理。整个生育期适时进行统一的除草、施肥(底肥施用17-17-17的复合肥20 kg,6月上旬和7月中旬分别追施纯氮75 kg·hm⁻²)、防虫、灌水(生育期分4次灌溉,共计220 m³),2022年9月中旬收获。试验所选湖南稷子的品种为海子一号,来自宁夏回族自治区平罗县千叶青农业科技发展有限公司。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤物理性状指标 在2022年9月下旬湖南稷子收获后,每个处理区以S型布置5个采样点,按表层0~20 cm和耕层20~40 cm用环刀取样,采用环刀法测定各土层土壤容重^[16]。土壤密度近似值取 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;将测定容重的环刀浸入水中24 h,质量恒定后称重,按公式(1)测定饱和含水量;根据公式(2)计算总孔隙度;土壤毛管孔隙度的测定:将饱和的环刀样置于铝盒上,中间用滤纸隔开,放置12 h烘干至恒重,并称重,按照公式(3)计算土壤毛管含水量;毛管孔隙度依据公式(4)计算。

$$\text{饱和含水量} = (\text{浸泡后土质量} - \text{烘干土质量}) / \text{烘干土质量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{总孔隙度} = \text{饱和含水量} \times \text{容重} \quad (2)$$

$$\text{土壤毛管含水量} = (\text{放置后的土质量} - \text{烘干的土质量}) / \text{烘干的土质量} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{土壤毛管孔隙度} = \text{土壤毛管含水量} / \text{饱和含水量} \times \text{总孔隙度} \quad (4)$$

将采集的原状土样自然风干后除去粗根及小石块,并将大土块按自然裂痕剥离为 1 cm^3 左右。将风干土样过5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm筛,利用湿筛法测定水稳定性土壤团聚体粒径分布和稳定性,平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)和 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体占比($>0.25 \text{ mm}$ aggregate percentage, $R_{0.25}$),计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i w_i \quad (5)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{X}_i\right) \quad (6)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{0.25}}{M_T} \quad (7)$$

式中: \bar{X}_i 为*i*粒级的平均直径; w_i 为*X_i*相对应的粒级团聚体占总重的百分比; M_T 为团聚体粒级总质量; $M_{0.25}$ 是 $>0.25 \text{ mm}$ 粒级的累积土粒质量。

1.3.2 土壤化学性状指标 由于土壤盐分的空间差异,于2022年9月下旬收获后,在湖南稷子种植行内随机选取各处理一个固定区域进行取样。用土钻按5点采样法分别采集各区域0~40 cm层土样500 g,3次重复,装入自封袋中带回实验室风干、磨细,过1.00和0.25 mm筛,用于测定土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量。依据《土壤调查实验室分析方法》^[16],测定土壤各指标。采用pH计(FE-28,瑞士)测定土壤pH;采用电导率仪(FE-38,瑞士)测定电导率,根据计算公式(8)将电导率($EC_{1:5}$)转换为土壤全盐含量(total dissolved salt, TDS);采用重铬酸钾氧化外加热法测定土壤有机质含量;采用碱解扩散法测定碱解氮含量;采用碳酸氢钠浸提一分光光度计法测定速效磷含量;采用醋酸铵—火焰光度计法测定速效钾含量。

$$TDS = 0.003EC_{1:5} \quad (8)$$

1.3.3 湖南稷子出苗率及产量 用钢卷尺随机测量条播小区3行出苗长度,除以3行总长度,记为出苗率;每个处理随机选取15株湖南稷子用直尺测量其高度,用游标卡尺测倒数第2节茎粗;湖南稷子成熟后随机割取小区内2 m样段,用其干草产量换算得出每 hm^2 产量。在小区内随机取15株湖南稷子,人工分离茎和叶后截成小段,于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青1 h, $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干后冷却,称量干重,叶茎比=叶片干重/茎秆干重。

1.4 土壤质量指数

采用线性计算模型,将土壤盐碱指标和养分指标数据转化为0~1的无量纲分数,本研究中公式(9)表示“越多越好”型指标评分函数(如土壤养分)和公式(10)表示“越少越好”型指标评分函数(例如,pH、盐分)^[8,17]。

$$S_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

$$S_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

式中: S_i 表示线性评分(0~1); x_i 表示指标的测量值; x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示指数的最高值和最低值。

本研究采用主成分分析法计算 0~40 cm 各指标的权重值。权重等于各指标的公因子方差占有所有指标公因子方差之和的比例,用公式(11)计算土壤质量指数 $SQI^{[17]}$ 。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (11)$$

式中: S_i 代表指标得分; n 为指标数量; W_i 代表指标权重值;本研究中 $n=11$; SQI 值越高,代表土壤质量更好。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2019 进行统计, SPSS 23 进行方差分析和 LSD 检验, 利用 Origin 2024 制作柱形图, 采用 R Studio 软件进行冗余分析, 绘制 Mantel Test 结果。

2 结果与分析

2.1 有机-无机物料配施对土壤理化性质的影响

2.1.1 对土壤物理性质的影响 施用不同配比有机-无机物料后, 耕层土壤理化状况均得到不同程度的改善(表 2)。在 0~20 cm 耕层土壤, 与 CK 相比, PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃ 处理土壤容重分别下降了 11.84%、7.89%、11.18%、19.08%、13.82%, 均显著低于 CK ($P<0.05$); 土壤总孔隙度分别增加了 16.08%、12.02%、20.49%、28.93%、18.54%, 毛管孔隙度分别增加了 24.13%、1.10%、4.07%、14.86%、-14.70%, 饱和持水量分别增加了 26.78%、21.78%、23.27%、27.85%、19.58%, 毛管持水量分别增加了 24.53%、9.47%、18.42%、41.73%、4.74%; 在 20~40 cm 耕层土壤, 与 CK 相比, 土壤容重分别下降了 6.02%、5.42%、7.83%、13.25%、12.05%, 均显著低于 CK ($P<0.05$); 土壤总孔隙度分别增加了 8.01%、2.49%、8.53%、16.69%、16.71%, 毛管孔隙度分别降低了 4.33%、-5.73%、6.99%、7.17%、10.72%, 饱和持水量分别增加了 15.90%、8.56%、18.24%、35.09%、33.23%, 毛管持水量分别增加了 2.34%、12.02%、1.42%、7.52%、1.91%。

表 2 不同有机-无机物料配施对不同耕层土壤物理性质的影响

Table 2 Effect of different ratios of organic-inorganic materials on the physical properties of soils in different tillage layers

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	饱和持水量 Saturated water holding capacity (%)	毛管持水量 Capillary moisture (%)
0~20	CK	1.52±0.00a	40.61±0.46d	30.01±0.22c	26.59±0.24c	19.65±0.10d
	PM	1.34±0.14bc	47.14±1.70bc	37.25±4.54a	33.71±3.05b	24.47±2.40b
	CM	1.40±0.04ab	45.49±2.58c	30.34±0.09c	32.38±2.86b	21.55±0.62bcd
	PCM ₁	1.35±0.11bc	48.93±2.35b	31.23±1.63bc	36.45±4.91b	23.27±3.23bc
	PCM ₂	1.23±0.03c	52.36±1.74a	34.47±2.87ab	42.35±0.29a	27.85±1.59a
	PCM ₃	1.31±0.04bc	48.14±0.61bc	25.60±0.44d	36.82±1.74b	20.58±0.92cd
20~40	CK	1.66±0.02a	38.59±0.12d	27.05±0.09b	23.14±0.44d	16.22±0.20c
	PM	1.56±0.06b	41.68±2.59bc	25.88±0.13c	26.82±2.83bc	16.60±0.64bc
	CM	1.57±0.01b	39.55±0.16cd	28.60±0.31a	25.12±0.08cd	18.17±0.33a
	PCM ₁	1.53±0.04bc	41.88±0.22b	25.16±0.64d	27.36±0.57b	16.45±0.85c
	PCM ₂	1.44±0.02d	45.03±1.37a	25.11±0.15d	31.26±0.31a	17.44±0.25ab
	PCM ₃	1.46±0.04cd	45.04±0.00a	24.15±0.21e	30.83±0.87a	16.53±0.61bc

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level.

2.1.2 对土壤化学性质的影响 施用不同有机-无机物料的不同耕层土壤 pH 和全盐含量均有不同程度的降低(图 1)。在 0~20 cm 土层, PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃ 处理土壤 pH 与 CK 相比, 分别显著降低了 1.26%、0.76%、2.77%、2.90%、2.77% ($P<0.05$), 土壤全盐含量分别显著降低了 12.68%、10.63%、26.18%、30.88%、

17.79% ($P < 0.05$); 在 20~40 cm 土层, 各处理土壤 pH 与 CK 相比, 分别降低了 1.77%、0.63%、1.14%、1.90%、0.88%, 全盐含量分别降低了 10.99%、0.45%、24.22%、23.77%、17.04%, 处理 CM 的 pH 和全盐含量与 CK 无显著差异。

各处理的土壤养分均不同程度高于对照 ($P < 0.05$), 在 0~20 cm 土层, PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃ 处理土壤有机质含量较 CK 分别提高了 75.80%、46.99%、57.62%、80.29%、92.45%, 碱解氮含量较 CK 分别提高了 2.17%、0.09%、2.89%、11.39%、5.42%, 有效磷含量较 CK 分别提高了 3.28%、2.45%、5.07%、14.30%、11.49%, 速效钾含量较 CK 分别提高了 55.59%、44.50%、69.79%、84.67%、89.54%; 在 20~40 cm 土层, 土壤有机质含量较 CK 分别提高了 22.73%、12.21%、33.25%、75.36%、71.96%, 碱解氮含量较 CK 分别提高了 2.44%、1.36%、3.80%、5.43%、4.70%, 速效磷含量较 CK 分别提高了 4.38%、3.46%、6.87%、8.94%、8.16%, 速效钾含量较 CK 分别提高了 57.62%、51.81%、68.26%、87.11%、89.01%。而 PCM₂ 和 PCM₃ 处理之间有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量无显著差异。

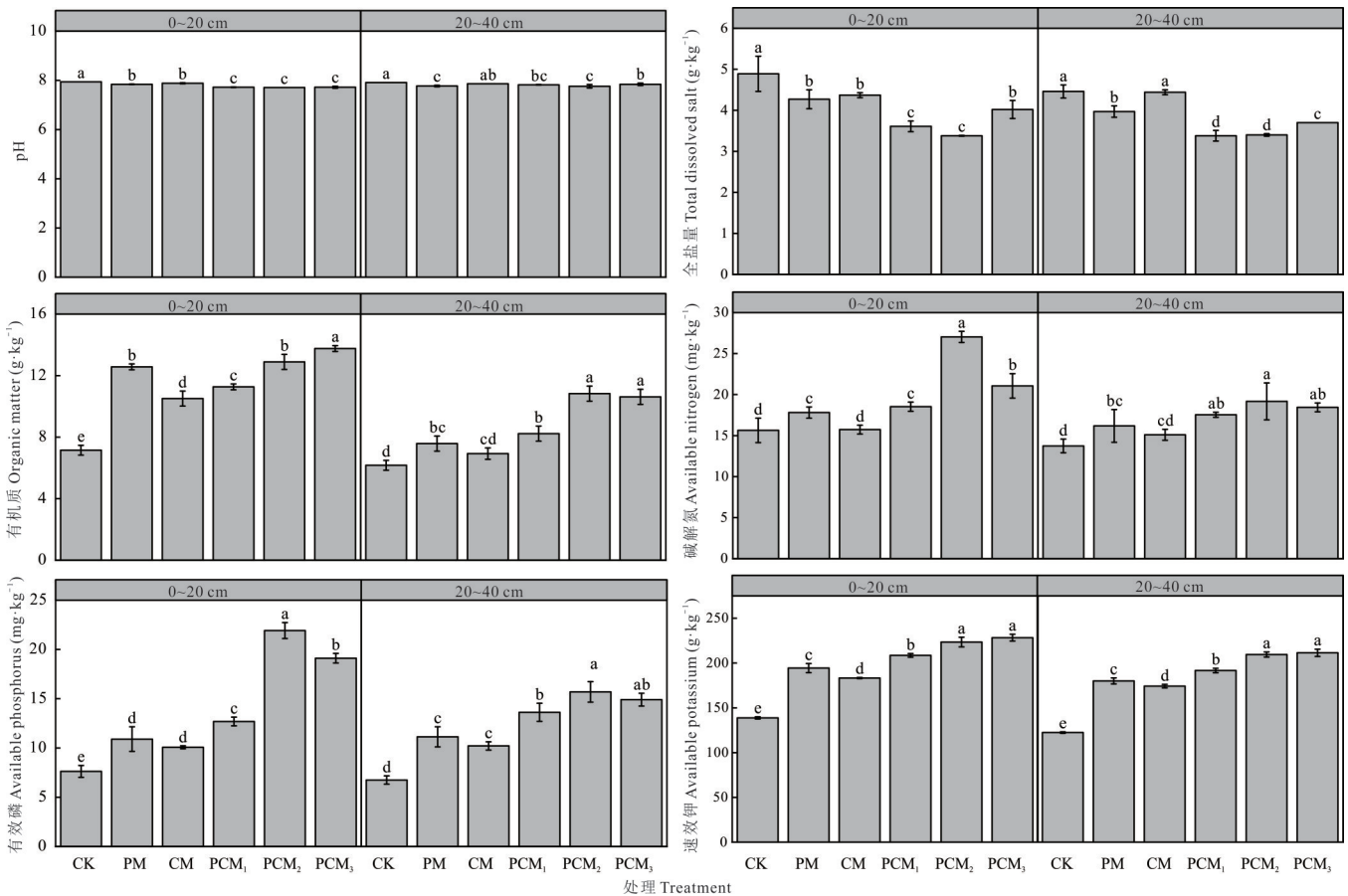


图 1 不同有机-无机物料配施对不同土层土壤化学性质的影响

Fig. 1 Effect of different ratios of organic-inorganic materials on soil chemical properties in different tillage layers

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer at $P < 0.05$ level, the same below.

2.2 有机-无机物料配施对土壤团聚体粒径分布与稳定性的影响

2.2.1 对土壤团聚体粒径分布的影响 经过 2 年有机-无机物料处理后, 各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 > 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数均较 CK 显著提高 ($P < 0.05$), 而 < 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数比 CK 显著降低 (图 2)。0~20 cm 土层, > 5 mm、 < 0.25 mm 粒径团聚体质量分数均高于其他粒径, 而 2~5 mm、1~

2 mm、0.5~1.0 mm、0.25~0.50 mm 粒径团聚体质量分数变幅为 2.02%~4.76%。施用改良剂各处理,除 CM 外,>5 mm、2~5 mm 粒径团聚体质量分数较 CK 分别显著提高 15.58%~138.17% 和 19.57%~79.60% ($P<0.05$)。各处理 20~40 cm 土层 >5 mm 粒径团聚体质量分数均高于 CK,提高幅度 52.88%~268.91% ($P<0.05$) ; 0.25~2.00 mm 粒径团聚体质量分数稳定在 2.21%~5.59%。其中,PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃ 处理 >5 mm 粒径团聚体质量分数分别较 CK 处理显著提高 52.88%、89.07%、132.72%、268.91%、191.24% ($P<0.05$)。

2.2.2 对土壤团聚体稳定性的影响 施用改良剂显著影响土壤团聚体稳定性参数,包括平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和 $R_{0.25}$ ($P<0.05$)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层内,均以 PCM₂ 处理的 GMD 最高,PCM₃ 处理次之(图 3),分别较 CK 显著提高 47.37%、21.05% 和 280.77%、142.31% ($P<0.05$)。PM 和 PCM₁,PM 和 CM 处理间差异不显著。与 CK 相比,PCM₂ 处理在 0~20 和 20~40 cm 土层中的 MWD 分别提高了 83.05% 和 179.80%,PCM₃ 处理分别提高 38.98% 和 118.18%。此外,与 CK 相比,施用改良剂 0~40 cm 土层中的 $R_{0.25}$ 增幅为 5.71%~144.44%。除了 20~40 cm 土层 PM 和 CM 处理的土壤团聚体 $R_{0.25}$ 、GMD 无显著差异外,其余各处理间的 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均达到显著差异水平 ($P<0.05$),说明不同配比有机-无机物料的施用能显著增加土壤团聚体程度,提高土壤团聚体稳定性。

2.3 有机-无机物料配施对土壤质量的影响

采用全数据集(共 11 个指标)对 0~40 cm 土层不同土壤质量指数(SQI)进行计算并对数据集进行主成分分析,提取各指标公因子方差,计算各指标权重(表 3)。通过公式(9)和(10)将全数据集中的指标转换为 0~1 的分数。本研究中,“越多越好”型评分计算模式应用于对土壤性质有正效应的相关指标,包括总孔隙度、有机质、有效磷、速效钾、MWD、GMD 和 $R_{0.25}$;“越少越好”型评分计算模式应用于对土壤性质有负效应的相关指标,包括土壤 pH、全盐量、容重。

在 0~20 cm 土层 11 个指标中,PCM₁ 处理除 TDS 和碱解氮外,其余指标得分均高于 CK(图 4)。PCM₂、PCM₃ 处理所有指标得分均高于 CK 处理,PCM₂ 处理所有指标均高于 PCM₁ 和 PCM₃。PCM₃ 处理除 pH 外,其余指标得

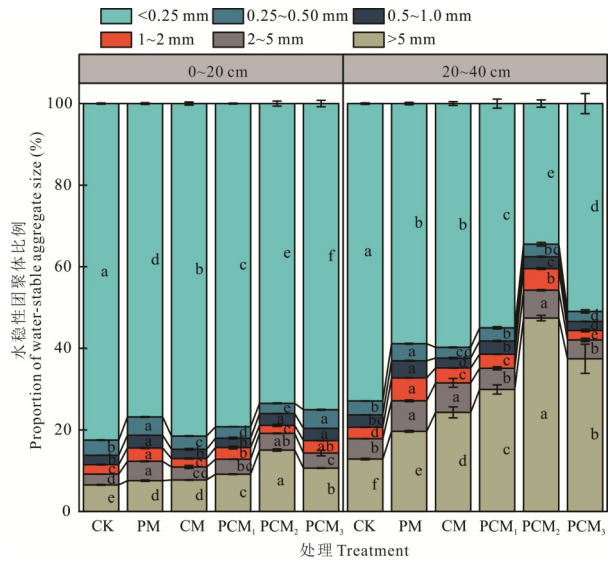


图 2 有机-无机物料配施对土壤团聚体组成的影响
Fig. 2 Effect of organic-inorganic material ratios on the composition of soil aggregates

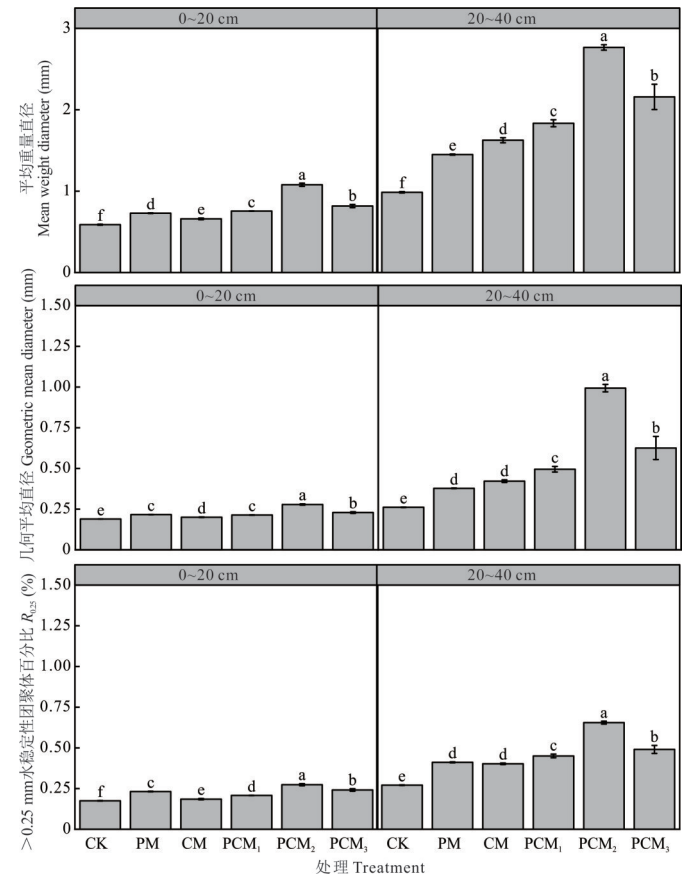


图 3 不同有机-无机物料配施对土壤团聚体稳定性的影响
Fig. 3 Effect of different organic-inorganic material ratios on the stability of soil aggregates

分均高于PCM₁处理。20~40 cm土层,PCM₁、PCM₂、PCM₃处理所有指标得分均高于CK,其中土壤pH、全盐量、容重、总孔隙度、有机质、有效磷、速效钾、MWD、GMD和R_{0.25}指标得分均比CK处理增加48.95%以上。

表3 土壤质量评价指标公因子方差和权重

Table 3 Common factor variance and weight of soil quality evaluation indicators

指标 Indicators	0~20 cm		20~40 cm		指标 Indicators	0~20 cm		20~40 cm	
	公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight		公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight
	BD	0.684	0.065	0.895		0.085	AP	0.896	0.085
FC	0.837	0.080	0.905	0.086	AK	0.864	0.082	0.906	0.086
pH	0.673	0.064	0.678	0.064	MWD	0.885	0.084	0.882	0.084
TDS	0.821	0.078	0.444	0.042	GMD	0.860	0.082	0.778	0.074
SOM	0.741	0.071	0.834	0.079	R _{0.25}	0.878	0.084	0.884	0.084
AN	0.829	0.079	0.815	0.077					

BD: 容重 Bulk density; FC: 总孔隙度 Total porosity; TDS: 全盐量 Total dissolved salt; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; AN: 速效氮 Alkaline nitrogen; AP: 速效磷 Alkaline phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter; R_{0.25}: >0.25 mm 团聚体占比 >0.25 mm aggregate percentage. 下同 The same below.

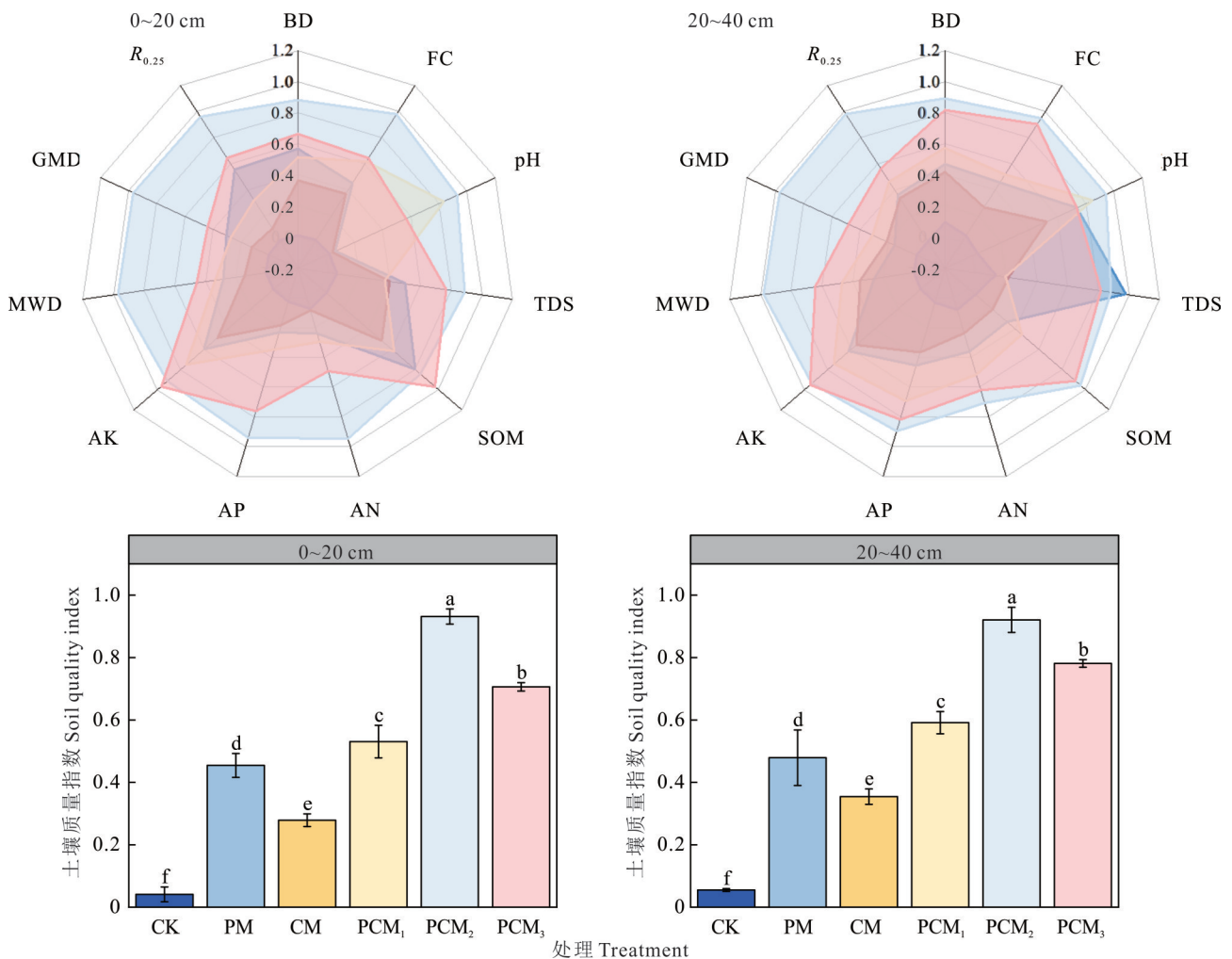


图4 不同有机-无机物料配施对0~40 cm土壤指标得分、土壤质量指数的影响

Fig. 4 Effect of different organic-inorganic material ratios on soil index scores and soil quality index from 0-40 cm

施用有机-无机物料能够显著增加土壤质量指数(图4)。不同处理下,0~20 cm和20~40 cm土层土壤质量指数从大到小依次为:PCM₂(0.93,0.92)、PCM₃(0.71,0.78)、PCM₁(0.53,0.59)、PM(0.45,0.48)、CM(0.28,0.35)、CK(0.04,0.06)。0~40 cm土层PCM₂和PCM₃处理SQI显著高于CK。PCM₂处理SQI比PCM₃处理增加31.92%和17.84%,并且6个处理间均达到显著性差异水平。

2.4 有机-无机物料配施对湖南稷子生产力的影响

2.4.1 对鲜干比和叶茎比的影响 有机-无机物料配施均显著影响湖南稷子鲜干比和叶茎比($P < 0.05$)。与CK相比,PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃处理鲜干比分别提高了18.79%、13.69%、9.98%、19.21%、17.41%,叶茎比分别提高了21.09%、1.81%、22.90%、26.51%、24.11%,PM、PCM₁、PCM₂、PCM₃处理之间叶茎比无显著差异(图5)。鲜干比和叶茎比均在PCM₂处理下达最高,分别为3.74和0.70。

2.4.2 对出苗率和产量的影响 与CK相比,PM、CM、PCM₁、PCM₂、PCM₃处理的出苗率分别提高了30.41%、11.49%、65.54%、62.84%、68.24%,CM处理出苗率和对照差异不显著(图6);产量分别提高了40.55%、25.09%、43.97%、50.07%、47.76%($P < 0.05$),增产效果PCM₂ > PCM₃ > PCM₁ > PM > CM; PCM₁、PCM₂、PCM₃处理间出苗率和产量无显著差异。

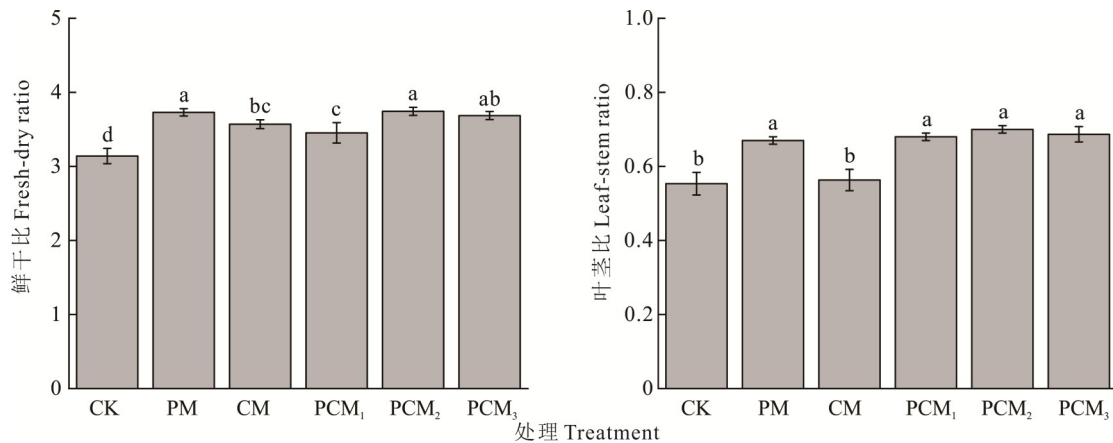


图5 不同有机-无机物料配施对湖南稷子鲜干比和叶茎比的影响

Fig. 5 Effect of different organic-inorganic material ratios on fresh-dry ratio and leaf-stem ratio of *E. frumentacea*

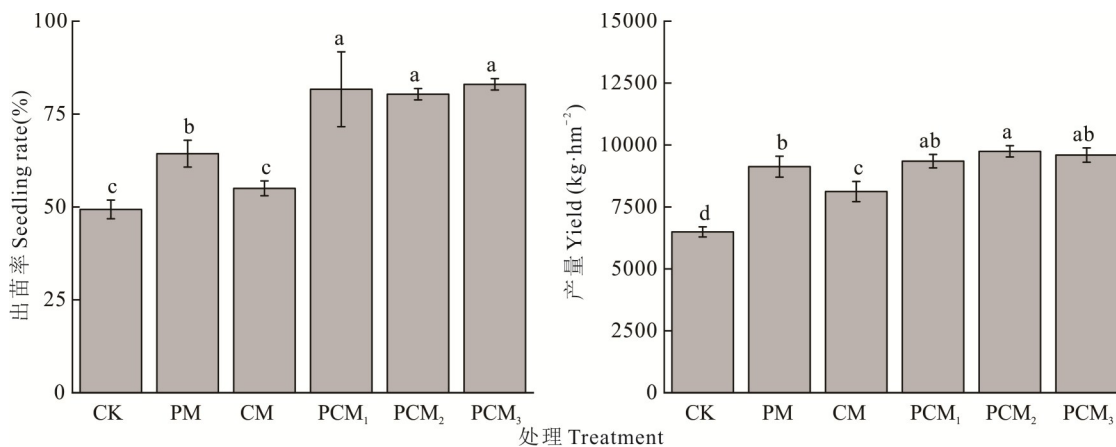


图6 不同有机-无机物料配施对湖南稷子出苗率和干草产量的影响

Fig. 6 Effect of different organic-inorganic material ratios on seedling rate and yield of *E. frumentacea*

2.5 有机-无机物料配施对土壤质量和产量与土壤性质关系的影响

冗余分析结果表明(图7),轴1和轴2分别解释了图中0~20 cm土层中总变异的98.86%和1.14%,以及

20~40 cm 土层中总变异的 98.92% 和 1.08%。0~20 cm 土层土壤有机质与速效钾呈正相关关系,与容重、pH、全盐量呈负相关关系。20~40 cm 土层土壤团聚体稳定性与孔隙度、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾呈正相关关系,与容重、pH、全盐量呈负相关关系。有机-无机物料的添加对土壤养分和团聚体稳定性的影响均大于 CK,其中以 PCM₁、PCM₂ 和 PCM₃ 的影响较明显。所有土壤样品都有明确的分离,从结果来看,相较于 CK,这种分组是显著的。此外,线性回归分析显示 SQI 与湖南稷子产量存在显著正相关关系(图 8)。

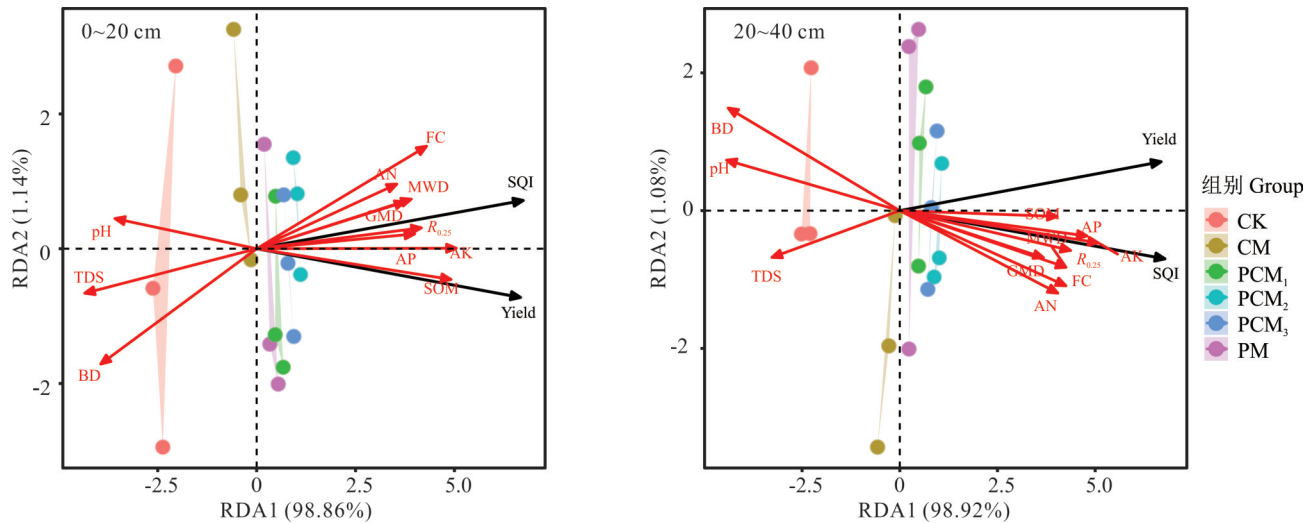


图 7 不同有机-无机物料配施下土壤质量和产量与土壤性质冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of soil quality and yield with soil properties under different organic-inorganic material ratios

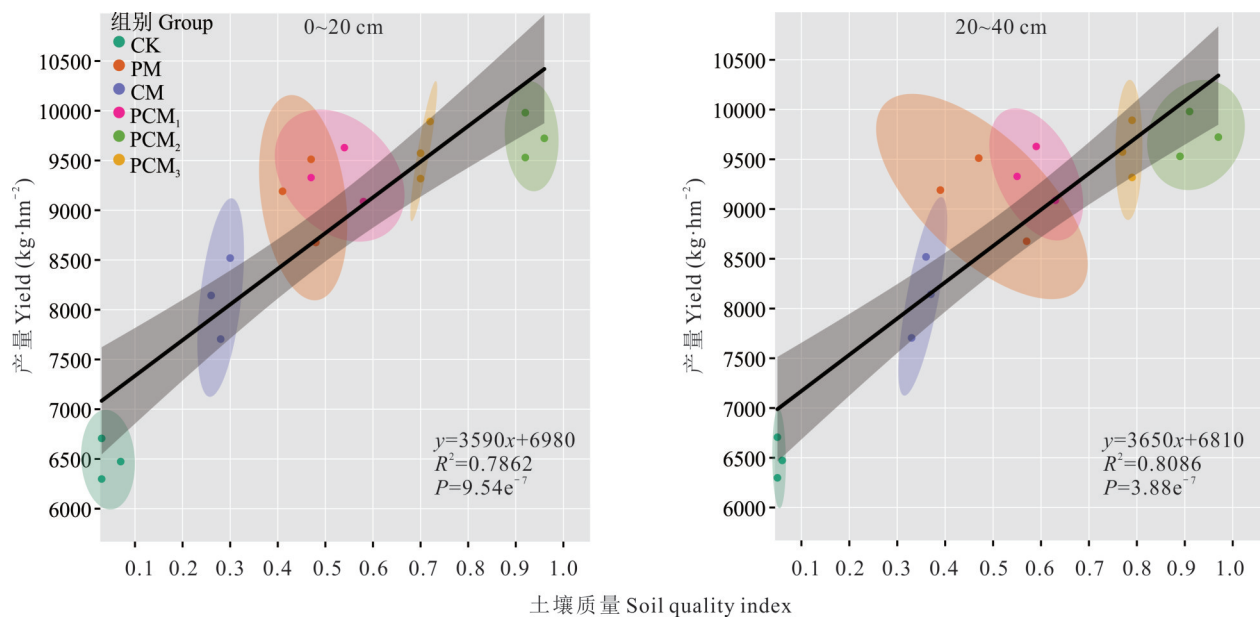


图 8 不同有机-无机物料配施下湖南稷子产量与土壤质量指数的关系

Fig. 8 Relationship of *E. frumentacea* yield and soil quality index under different organic-inorganic material ratios

不同土层深度下土壤质量和产量与土壤因子间具有不同的相关性结果。在 0~20 cm 土层(图 9),土壤质量和产量与容重、孔隙度、全盐量、有机质、速效钾和出苗率间的相关性极强($r \geq 0.5$),同时呈极显著性相关($P \leq 0.001$);pH、MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 与土壤质量和产量的显著性较强($P < 0.05$),同时相关性较强($0.2 \leq r \leq 0.5$)。在 20~40 cm 土层(图 9),土壤质量和产量与容重、孔隙度、pH、有效磷、速效钾和出苗率间的相关性($r \geq 0.5$)和显

著性 ($P < 0.001$) 均极强; TDS 和 SOM 与土壤质量和产量的显著性较高 ($P < 0.01$), 但相关性较低 ($0.2 \leq r < 0.5$)。总体来看, 研究区土壤质量和产量变化受土壤因子的强烈影响。

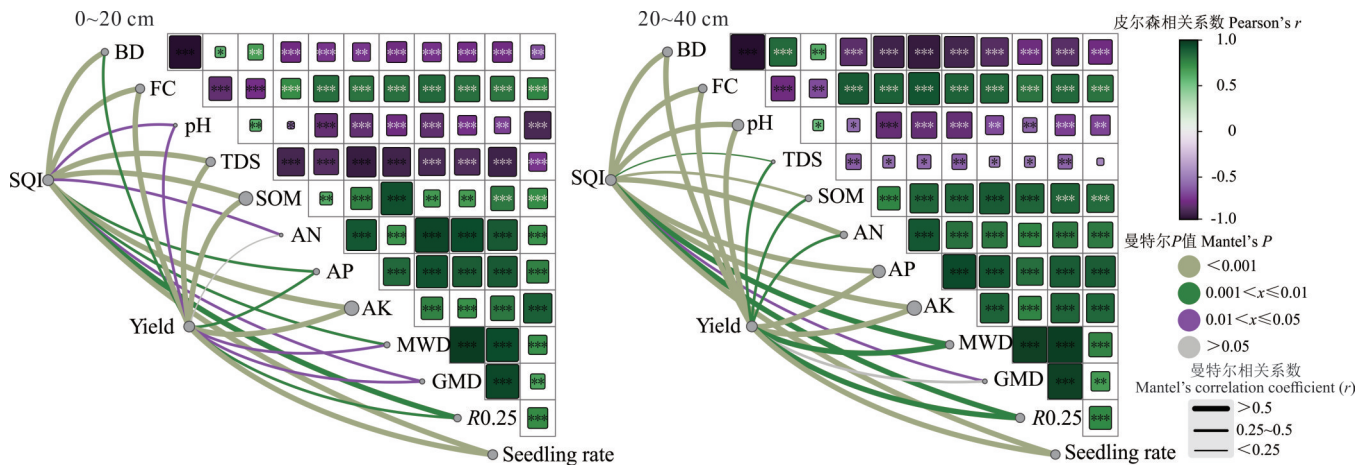


图 9 土壤质量和产量与土壤性质的 Mantel 检验分析

Fig. 9 Mantel test analysis of soil quality and yield with soil properties

Seedling rate: 出苗率; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

3 讨论

3.1 有机-无机改良物料配施对土壤盐碱性和土壤肥力的影响

pH、全盐是造成土壤生态环境恶化的关键因素, 与土壤中养分形态、有效性、有机质矿化及土壤生物活性密切相关。与 CK 相比, 有机-无机物料配施的施用显著降低了盐碱化土壤的 pH 和全盐含量 (图 1)。这与 Kim 等^[18]关于脱硫石膏和秸秆堆肥处理对盐碱土壤 pH 和全盐含量降低效果更明显的结果一致。原因主要包括: 1) 有机-无机物料配施后, 其中所含的腐殖酸、富里酸等会与土壤中的碱性物质发生反应, 所以能明显降低盐碱土的 pH^[19]。2) 施加有机肥后, 伴随土壤中有机质含量的增加, 土壤团聚体的数量会得到进一步提升。而土壤团聚体的增加会破坏土壤中的毛管孔隙 (表 2), 提升土壤的代换量, 极大地减弱盐碱土壤的返盐能力, 从而使得土壤盐分得到降低^[20]。3) 钙质改良剂可为土壤提供大量 Ca^{2+} , 置换掉盐碱土中的交换性 Na^+ , 改变土壤胶体性质, 与 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 结合形成 CaCO_3 沉淀, 从而降低土壤 pH 和全盐含量^[5, 21]。但是随着改良剂用量的增大, 处理间对于土壤 pH 的变化差异趋于不显著, 说明过量的改良剂可能会因为灌溉淋洗不充分, 反而导致土壤的含盐量上升^[11]。

土壤容重直接影响土壤孔隙度与孔隙大小分配、土壤的产投阻力及土壤水肥气热的变化, 是重要的土壤基础数据^[7]。众多研究表明, 改良剂的施用能有效改善盐碱化土壤的物理性质, 降低土壤容重, 增加土壤孔隙度^[22]。脱硫石膏、磷石膏、腐殖酸和堆肥等有机物料作为有效的 Ca^{2+} 和有机质来源均已广泛用于盐碱土改良^[23]。但有研究认为影响盐碱土理化性质的因素复杂, 不同改良剂混合配施相较于单一改良剂效果更好^[24]。本研究结果表明, 有机-无机物料配施显著降低了土壤容重, 增加了土壤的孔隙度, 提高了土壤的持水能力, 在磷石膏 ($30.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、过磷酸钙 ($600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、腐熟羊粪 ($30.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配比处理下对盐碱地土壤容重、孔隙度等物理改良效果最佳 (表 2)。盐渍化土壤盐碱程度高, 养分含量低, 土壤质量的改善和地力的提升对盐碱地的改良至关重要^[25]。曲长凤等^[26]研究表明, 改良剂通过直接增加或者促进营养元素有效化来改善土壤性质等间接提高土壤养分含量。本研究中, 与 CK 相比, 有机-无机物料配施的施用显著增加了耕层土壤的有机质、碱解氮、速效磷等养分含量 (图 1)。这与白小龙等^[27]和张晓东等^[28]复合改良物料对土壤养分的影响结果一致。其原因可能是: 1) 配施物料中大量的磷石膏和腐熟羊粪的投入, 为盐碱土壤提供了大量的 Ca^{2+} 和有机质来源, Ca^{2+} 对土壤的团聚作用加强了对有机质的保护, 促进了有机质的积累; 而反过来有机质作为土壤中营养元素氮、磷的重要来源, 能吸附较多的阳离子, 使土壤具有保肥性和缓冲性。2) 这种增幅主要来自施加的有机肥本身含有多种营养元素^[29], 通过矿化分解

缓慢长效地释放到土壤中,而且在这个过程中会有各种有机酸生成,可溶解土壤中原有的钾盐、磷酸盐等矿物盐,从而增加了磷、钾等元素的有效性^[30]。3)有机肥^[31]和石膏^[32]能够增加盐碱土水肥固持能力^[33],降低土壤氮淋失。同时,增加了 Ca^{2+} ,生成磷酸钙沉淀^[34],能够增加土壤有效磷。并且土壤中钾含量变化不受微生物影响,主要受土壤阳离子含量变化影响,因此改良剂中的 Ca^{2+} 也会置换出一定量的 K^+ ,从而增加水溶性 K^+ 含量,进而增加了土壤速效钾含量(图1),这与Lashari等^[35]的研究结果一致。

3.2 有机-无机改良物料配施对土壤团聚体的影响

土壤团聚体是健康土壤的构建基础,其大小、数量、比例和微形态能够很好地反映土壤结构的稳定性,对于表征土壤质量有着重要的作用^[36]。研究表明,有机肥的施用能够有效提高土壤中大团聚体含量^[37]。但由于盐碱土自身特性, Na^+ 通过防止胶体絮凝并破坏黏土矿物的结构来引起聚集体颗粒崩解、膨胀和分散,最终破坏土壤团聚体结构^[38]。Regelink等^[39]发现相近有机碳含量下,碱性土壤拥有的水稳性团聚体比酸性土壤的比例低,pH在团聚体形成和稳定中具有重要作用。本研究结果显示,有机-无机物料配施处理后大团聚体逐渐增多(图2),水稳性团聚体稳定性指数 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD较CK均显著增大(图3),这与金梦野等^[40]和王德领等^[41]的研究结果相似。产生本研究结果的原因可能是,首先,在不同的改良物料配施后,改善了土壤理化性质,影响了土壤微生物群落,并增加了微团聚体中有机碳的含量。其次因为有机物料是 Ca^{2+} 的直接来源,可取代阳离子交换位点上的 Na^+ ^[42]。加速盐碱土中 Na^+ 淋洗,促进土壤中有机质和 Ca^{2+} 等多价阳离子以阳离子桥的形式形成有机-矿质复合体土壤复粒。此外,一些官能团,如放线菌和AMF,可能影响土壤聚集^[43],因为它们相对于细菌具有丰富的菌丝^[44]。细根和菌根菌丝网络像“黏性网袋”将土壤微团聚体胶结成大团聚体^[45]。从而对促进盐碱地良好土壤团聚结构的形成十分重要。

3.3 有机-无机改良物料配施提高土壤质量和产能的协同作用

利用SQI整合不同土壤理化指标揭示有机-无机物料配施对土壤盐碱指标及养分的综合效应^[46],结果(图4)显示,磷石膏、过磷酸钙和腐熟羊粪施用处理显著增加了SQI,PCM₂和PCM₃处理土壤pH、全盐量、容重、总孔隙度、有机质、有效磷、速效钾、MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 具有较高得分,说明改良剂处理通过降低土壤盐碱程度和增加土壤养分两方面提高了土壤质量。

有机-无机物料配施显著提高了湖南稷子的出苗率和产量。产量和出苗率与土壤pH、容重和全盐含量呈负相关关系,与总孔隙度、有机质、有效磷、速效钾含量、MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 呈正相关关系(图7),且湖南稷子产量与SQI呈显著正相关关系(图8),说明土壤质量的提升能够显著影响湖南稷子的出苗率和产量,这与Yan等^[46]的研究结果一致。

盐碱地土壤养分贫瘠、盐碱程度高,保证植物出苗率、增加作物产量是盐碱地工作关注的重点。卢星辰等^[6]研究表明,脱硫石膏、蚯蚓粪等改良剂的投入,可以显著提高中度盐碱地玉米(*Zea mays*)的出苗率和生物量。张盼盼等^[47]研究表明,有机肥配施磷石膏对作物的增产效果优于单施有机肥或者磷石膏。王金满等^[48]研究表明,石膏的施用使碱化土壤上葵花(*Helianthus annuus*)的出苗率和单株产量提高到了92.5%和36.4g。在本试验中,磷石膏和过磷酸钙配施腐熟羊粪显著提高了湖南稷子的鲜干比、叶茎比、出苗率和产量(图5和图6),最高分别达3.74、0.70、83%、9744 kg·hm⁻²,较CK分别提高了19.21%、26.51%、62.84%和50.07%,与前人结果一致,表明有机-无机物料配施更有利于提升土壤质量和盐碱地上作物的生产性能。

4 结论

与不施改良物料(CK)处理相比,有机-无机物料配施显著降低了盐碱地土壤的pH、全盐含量和容重,提高了>0.25 mm水稳性团聚体的比例和稳定性;同时能够增加土壤有机质和速效养分,提升基于全数据集的土壤质量指数(SQI),进而提高了湖南稷子产量,二者呈显著正相关关系。各处理中,以磷石膏(30.0 t·hm⁻²)、过磷酸钙(600 kg·hm⁻²)和腐熟羊粪(30.0 t·hm⁻²)配施处理的土壤质量指数(0.93)和湖南稷子产量(9744 kg·hm⁻²)最高,因而可作为一种土壤改良剂高效施用技术在宁夏银北平原及同类型地区盐碱地应用。

参考文献 References:

- [1] Yang J S. Development and prospect of the research on saline-affected soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837–845.
杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837–845.
- [2] Zhang L, Yang J S, Yao R J, *et al.* The distribution and potential functions of prokaryotic communities in saline soils of Hetao irrigation district. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 527–538.
张璐, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套灌区盐渍土壤原核生物群落特征及其潜在功能研究. *土壤学报*, 2024, 61(2): 527–538.
- [3] Zhao Y, Wang L, Zhao H L, *et al.* Research status and prospects of saline-alkali land amelioration in the coastal region of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(3): 67–74.
赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 67–74.
- [4] Zhao Y, Wang S, Li Y, *et al.* Long-term performance of flue gas desulfurization gypsum in a large-scale application in a saline-alkali wasteland in northwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 261: 115–124.
- [5] Shen J L, Wang B, Xu X. Review on research of using desulfurized gypsum to ameliorate saline-sodic soil. *Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 37(1): 65–69.
沈婧丽, 王彬, 许兴. 脱硫石膏改良盐碱地研究进展. *农业科学研究*, 2016, 37(1): 65–69.
- [6] Lu X C, Zhang J S, Miao Q, *et al.* Improvement effects of different amelioration materials and their combinations on coastal saline-alkaline soils in the Yellow River Delta. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 326–332.
卢星辰, 张济世, 苗琪, 等. 不同改良物料及其配施组合对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效果. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 326–332.
- [7] 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.
- [8] 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. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 148–157.
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. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 148–157.
- [9] Xue Y S, Shi C H, Wang Y X, *et al.* Mixed application of superphosphate and organic fertilizers: Effect on photosynthetic characteristics and yield of wheat in saline soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(20): 1–6.
薛远赛, 师长海, 王源溪, 等. 过磷酸钙及有机肥混施对盐碱地小麦光合特性及产量的影响. *中国农学通报*, 2021, 37(20): 1–6.
- [10] Liu Y, Yang S Q, Zhang W F, *et al.* Effects of phosphogypsum and *Suaeda salsa* on the soil moisture, salt, and bacterial community structure of salinized soil. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2325–2337.
刘月, 杨树青, 张万锋, 等. 磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响. *环境科学*, 2023, 44(4): 2325–2337.
- [11] Zhang J, Tian R R, Wang S J, *et al.* Effects of calcium-based amendments on saline-alkali soil improvement and sunflower yield. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(11): 68–76.
张菁, 田荣荣, 王淑娟, 等. 钙基型土壤改良剂对盐碱土壤改良和向日葵产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2022(11): 68–76.
- [12] Buss W, Graham M C, Shepherd J G, *et al.* Risks and benefits of marginal biomass-derived biochars for plant growth. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 496–506.
- [13] Zhang Y, Cao J, Li G, *et al.* Metabolomics analysis of root exudates in *Echinochloa frumentacea* seeding stage under saline-alkali stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3540–3549.
张杨, 曹靖, 李广, 等. 盐碱胁迫下湖南稷子苗期根系分泌物代谢组学. *生态学报*, 2024, 44(8): 3540–3549.
- [14] Wan L S, Jiang W K, Liu S L, *et al.* A study on the high-yield property of billion dollar grass. *Pratacultural Science*, 1991(1): 13–18.
万力生, 姜文奎, 刘升林, 等. 海子1号湖南稷子高产性能的研究. *草业科学*, 1991(1): 13–18.
- [15] Lu A Q, Zhang F J, Xu X, *et al.* Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Echinochloa frumentacea* seedlings. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(5): 84–93.
陆安桥, 张峰举, 许兴, 等. 盐胁迫对湖南稷子苗期生长及生理特性的影响. *草业学报*, 2021, 30(5): 84–93.
- [16] Zhang G L. *Methods for laboratory analysis of soil investigation*. Beijing: Science Press, 2012.

张甘霖. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.

- [17] Chang F, Zhang H, Song J, *et al.* Once-middle amount of straw interlayer enhances saline soil quality and sunflower yield in semi-arid regions of China: Evidence from a four-year experiment. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118530.
- [18] Kim Y J, Choo B K, Cho J Y. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: Ten years of long-term experiments. *Catena*, 2017, 156: 131–138.
- [19] Yang W Y, Ji S F, Li D, *et al.* Effects of continuous application of commercial organic manure on farmland quality and vegetable yield. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4): 319–322.
杨文叶, 季淑枫, 李丹, 等. 连续施用商品有机肥对耕地质量及蔬菜产量的影响. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(4): 319–322.
- [20] Bal A R, Dutt S K. Mechanism of salt tolerance in wild rice (*Oryza coarctata* Roxb). *Plant and Soil*, 1986, 92(3): 399–404.
- [21] Ji Z Y, Zhou J X, Zhang H, *et al.* Effects of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pools of saline-sodic soil. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 2019, 38(8): 1759–1767.
冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 等. 不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1759–1767.
- [22] Mao W J, Li X P, An D, *et al.* Effects of different conditioners on soil structure of alkali soils in Ningxia Hui Autonomous Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(4): 190–192, 197.
毛文娟, 李新平, 安东, 等. 不同改良剂对宁夏地区盐碱土壤结构的影响. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 190–192, 197.
- [23] Chi C M, Zhao C W, Sun X J, *et al.* Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oryza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. *Geoderma*, 2012, 187/188: 24–30.
- [24] Wang H, Zhang Z Q, Liu J H, *et al.* Improvement effects of different amendments on soda saline-alkali soil. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(5): 569–575.
王涵, 张忠庆, 刘金华, 等. 不同改良剂对苏打盐碱土的改良效果. *吉林农业大学学报*, 2020, 42(5): 569–575.
- [25] Yang J S, Yao R J, Wang X P, *et al.* Halt soil salinization, Boost soil productivity. *Science*, 2021, 73(6): 30–34.
杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力. *科学*, 2021, 73(6): 30–34.
- [26] Qu C F, Yang J S, Yao R J, *et al.* Effect of different amendments on coastal saline-alkaline soils in the north Jiangsu. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3): 21–25.
曲长风, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对苏北滩涂盐碱土壤改良效果研究. *灌溉排水学报*, 2012, 31(3): 21–25.
- [27] Bai X L, Zhang E, Wu J M, *et al.* Effects of different modified materials on soil fungal community structure in saline—alkali soil. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3562–3570.
白小龙, 张恩, 武晋民, 等. 不同改良物料对盐碱土壤真菌群落结构的影响. *环境科学*, 2024, 45(6): 3562–3570.
- [28] Zhang X D, Li B, Liu G M, *et al.* Effects of composite soil improvement agents on soil amendment and salt reduction in coastal saline soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(11): 1744–1754.
张晓东, 李兵, 刘广明, 等. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价. *中国生态农业学报*, 2019, 27(11): 1744–1754.
- [29] Lu H Q, Tang W, Luo Z, *et al.* Effects of commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil nutrients, plant development, and yield in cotton. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(12): 2511–2521.
卢合全, 唐薇, 罗振, 等. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响. *作物学报*, 2021, 47(12): 2511–2521.
- [31] Zhang Y, Wang J, Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena*, 2021, 202: 105284.
- [32] Zhang F J, Xu X, Xiao G J. Influence of flue gas desulphurization gypsum on characteristics of soil aggregates in sodic soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 108–114.
张峰举, 许兴, 肖国举. 脱硫石膏对碱化土壤团聚体特征的影响. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 108–114.
- [33] Xu N, Tan G, Wang H, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 74: 1–8.
- [34] Rochester I J. Phosphorus and potassium nutrition of cotton: interaction with sodium. *Crop and Pasture Science*, 2010, 61(10): 825.
- [35] Lashari M S, Ye Y, Ji H, *et al.* Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1321–1327.

- [36] Zhang P, Wei T, Jia Z, *et al.* Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China. *Geoderma*, 2014, 230: 41–49.
- [37] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, *et al.* Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 159–165.
王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 159–165.
- [38] Yao R, Gao Q, Liu Y, *et al.* Deep vertical rotary tillage mitigates salinization hazards and shifts microbial community structure in salt-affected anthropogenic-alluvial soil. *Soil and Tillage Research*, 2023, 227: 105627.
- [39] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, *et al.* Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*, 2015, 247/248: 24–37.
- [40] Jin M Y, Huang J, Hou P, *et al.* Improvement effect of three environmental materials and their composite application on saline-alkali soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 118–124.
金梦野, 黄娟, 侯嫔, 等. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 118–124.
- [41] Wang D L, Zhuge Y P, Yang Q G, *et al.* Effects of three amendments on the soil properties of and maize growth in coastal saline-alkali soils. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 20–27.
王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(1): 20–27.
- [42] Ullah S, Dahlawi S, Naeem A, *et al.* Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 320–335.
- [43] Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, *et al.* Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecology Letters*, 2009, 12(5): 452–461.
- [44] De Gryze S, Six J, Brits C, *et al.* A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(1): 55–66.
- [45] Nichols K A, Halvorson J J. Roles of biology, chemistry, and physics in soil macroaggregate formation and stabilization. *The Open Agriculture Journal*, 2013, 7(1): 107–117.
- [46] Yan Z, Zhou J, Liu C, *et al.* Legume-based crop diversification reinforces soil health and carbon storage driven by microbial biomass and aggregates. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: 105848.
- [47] Zhang P P, Gao L C, Li X M, *et al.* Phosphogypsum and organic fertilizer: effects on yield and leaf physiological characteristics of broomcorn millet in saline-alkali soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(15): 26–32.
张盼盼, 高立城, 李晓敏, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子产量和叶片生理特性的影响. *中国农学通报*, 2018, 34(15): 26–32.
- [48] Wang J M, Yang P L, Shi Y, *et al.* Effects on physical and chemical properties of soil and sunflower growth when sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 34–37.
王金满, 杨培岭, 石懿, 等. 脱硫副产物对改良碱化土壤的理化性质与作物生长的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 34–37.