

有机物料对北方盐碱地土壤特性及燕麦产量的影响

卢培娜^{1,2}, 刘景辉^{1*}, 李立军¹, 白健慧¹, 赵宝平¹, 米俊珍¹, 刘敏³

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 甘肃农业大学 / 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 鄂尔多斯市农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为探究有机物料定位改良对盐碱土壤理化及生物学特性的影响, 于2016~2018年在内蒙古农业大学海流图试验基地盐碱环境开展试验, 对比分析空白对照(CK)、单施菌肥(F)、单施腐熟秸秆(S)及腐熟秸秆配施菌肥(FS)4个处理下土壤pH, 电导率, 土壤微生物生物量碳、氮、磷含量, 土壤酶活性及燕麦产量的变化。结果表明, 2016、2017和2018年F、S及FS处理均可以显著降低盐碱地燕麦生长各时期0~5、5~10、10~20、20~40 cm土层土壤pH, 显著提高土壤微生物生物量碳、氮、磷含量以及土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性, 且以FS处理表现最佳, 但会引起较高的土壤电导率, 其籽粒、鲜草和干草产量分别较CK处理在2016年提高121.48%、65.97%、48.22%, 2017年提高146.06%、102.13%、77.23%, 2018年提高36.55%、23.53%、43.20%; 2016和2017年燕麦经济效益也有所提高。此外, 2016、2017和2018年盐碱地连续施入有机物料, 燕麦籽粒产量直接和间接受到土壤理化及生物学特性的影响。

关键词: 盐碱地; 有机物料; 土壤微生物生物量; 土壤酶活性; 燕麦产量

全球土壤盐渍化问题日益严重, 已成为土地治理所面临的重大难题^[1]。全国盐渍土资源总面积为9913万hm²^[2], 主要分布在东北、华北、西北旱作区以及长江以北的沿海地区。截至2010年, 内蒙古自治区是我国盐碱土的主要分布地区之一, 其盐碱土面积高达313万hm², 其中耕地盐渍化面积达到46.7万hm², 且耕地次生盐渍化面积每年以1万~1.33万hm²直线增长^[3]。盐碱地土壤pH高, 有效养分含量低, 养分循环能力差, 限制作物生长, 严重制约我国农业生产和粮食安全^[4-5], 综合改良利用盐碱地对保障我国粮食安全有重要意义。

有机物料在改良盐碱地过程中可以显著调节盐碱地土壤酸碱度、提高土壤养分的生物循环能力及土壤肥力, 进而有利于作物生长, 提高作物产量, 对绿色开发利用盐渍化土壤具有重要意义^[6-10]。针对不同种类有机物料对盐碱地土壤生物学特性的研究颇多, 施用菌肥^[11]和腐熟秸秆^[7, 12]可以显著

优化土壤微生物种群结构, 影响土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)含量, 提高土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶活性, 且均受盐碱土壤环境中pH和电导率(EC)的显著驱动。本研究致力于长期利用腐熟秸秆配施菌肥在盐碱地定位改良, 发现其改良效果在农业生产实践中更具重要的现实意义^[10]。

本研究针对盐碱土壤pH、电导率高和肥力低导致作物产量低等问题, 以土壤养分循环具有重要意义土壤生物学特性为切入点, 采用腐熟秸秆与菌肥通过降低土壤pH与含盐量, 以提高土壤MBC、MBN、微生物生物量磷(MBP)含量以及相关土壤酶活性, 增强土壤养分循环能力, 以达到燕麦增产的目的, 以期为北方旱作区改善盐碱土壤及提高燕麦产量提供有效措施, 且为指导盐碱地燕麦生产提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与试验材料概况

2016~2018年在呼和浩特市内蒙古农业大学海流图园区(111°22'30"E, 40°41'30"N)连续开展定位试验。该地区土壤属于硫酸钠和氯化钠为主的盐碱土^[10], 试验地及材料详情见表1。2016~2018年燕麦生育期降水量与温度变化如图1所示。

收稿日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0107900); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-08); 国家自然科学基金(31901459)。

作者简介: 卢培娜(1992-), 助理研究员, 博士, 研究方向为耕作制度与农业生态系统研究。E-mail: peina-lu@hotmail.com。

通讯作者: 刘景辉, E-mail: cauljh@163.com。

表 1 试验地及改良材料的特征值

类别	pH	电导率 ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	碱解氮 有效磷 速效钾			总氮	总磷	总钾	有机质
			(mg · kg ⁻¹)						
试验地	9.14	1553.83	63.11	15.71	171.33	0.53	1.66	0.53	13.32
菌肥	6.85	125.93	532.42	166.52	222.79	84.67	0.16	9.33	372.60
腐熟秸秆	6.58	2.95	362.06	169.70	345.39	14.06	0.18	7.99	552.48

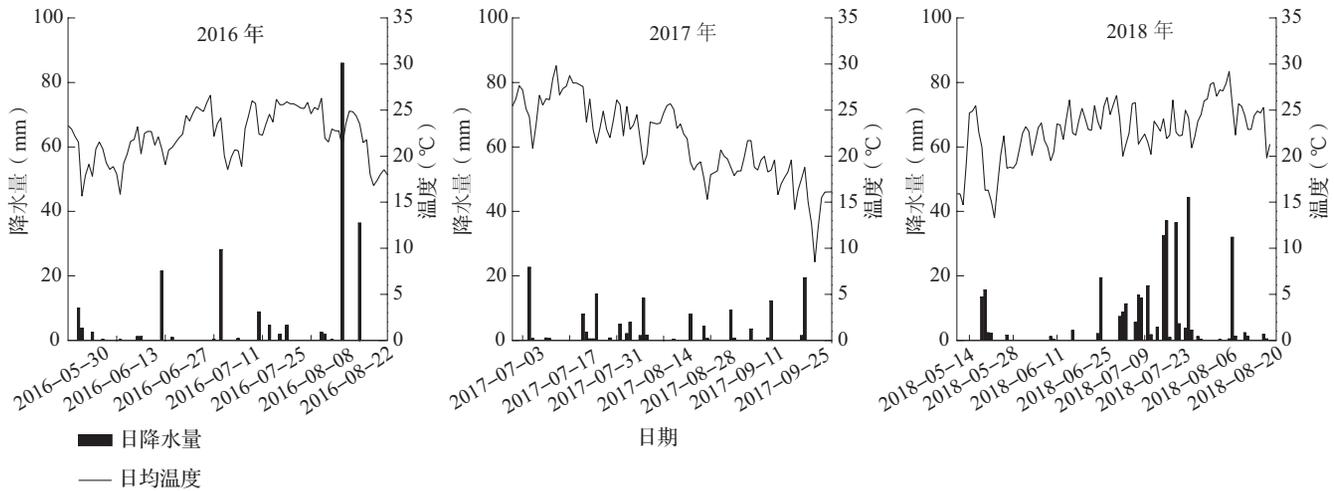


图 1 2016 ~ 2018 年燕麦生育时期内降水量及温度变化

1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理，分别为空白对照 (CK)、单施菌肥 (F)、单施腐熟秸秆 (S)、腐熟秸秆配施菌肥 (FS)，重复 3 次，共 12 个小区，小区面积 120 m² (8 m × 15 m)。根据之前研究结果^[9]，菌肥施用量 1500 kg · hm⁻²，腐熟秸秆施用量 11250 kg · hm⁻²，各处理底肥均施磷酸二铵 (18-46-0) 150 kg · hm⁻²，燕麦用种量 150 kg · hm⁻²，采用机械播种，行距 25 cm。播种前 15 d，将玉米腐熟秸秆按上述施入量均匀撒在地表，用旋耕机进行 0 ~ 10 cm 浅悬。播种时，利用播种机将菌肥和底肥一起施入土壤，再进行燕麦播种。由于燕麦生长前期较为干旱，每年燕麦苗期进行灌水 1 次，为缓解干旱造成减产的现象，小区田间管理完全一致。

1.3 取样与分析测定

1.3.1 样品取样方法

土壤样品分别在燕麦苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期及收获期 5 个生育时期进行采样，取样土层分别为 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层，每次在各小区内按 S 形采样法随机选取 5 点，将土壤同一土层的土样混合，每个样本用 2 mm 筛网筛分，分为两份样本：第一份是鲜土，储存在

4 °C 冰箱，用于土壤 MBC、MBN 和 MBP 的测定；第二份是风干土，用于土壤 pH、EC 及土壤酶活性的测定。

燕麦 5 个生育时期内分别取燕麦地上部植株样品，测定鲜草产量。植株群体进入成熟期后一周内选择晴日上午对燕麦种植小区进行统一测产，在各重复小区内分别选取面积 1 m²，收割晒干，测定地上部生物产量作为干草产量，脱粒称重作为籽粒产量，小区测产后计算公顷产量。

1.3.2 指标测定方法

土壤理化性质测定：土壤 pH 由 pH 计 (STARTER 3100) 测定，土壤与蒸馏水的比例为 1 : 2.5。土壤 EC 由电导率计 (STARTER3100C) 测定，土壤与蒸馏水之比为 1 : 5。

土壤微生物生物量测定^[13-14]：土壤 MBC、MBN 和 MBP 分别采用熏蒸提取 - 茚三酮比色法、熏蒸提取 - 容量分析法、熏蒸提取 - 钼锑抗比色法测定。首先，鲜土调节为土壤田间持水量的 60% (土壤含水量约为 12%)，然后在密封黑暗条件下，培养 15 d；其次，一部分土壤需在黑暗条件下进行氯仿熏蒸 24 h，另一部分土壤不进行熏蒸处理；接着，用 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 提取 MBC、MBN 和用

0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ 提取 MBP; 最后, 进行测定。计算方式如下: $MBC = E_c \times 0.38$, 式中 E_c 为熏蒸后与熏蒸前土壤有机碳差值; $MBN = E_{\min-N} / 0.54$, 式中 $E_{\min-N}$ 为熏蒸后与熏蒸前土样有机氮差值; $MBP = E_{P_i} / 0.45$, 式中 E_{P_i} 为熏蒸后与熏蒸前土样有机磷差值。测量结果单位均为 mg · kg⁻¹ 干土。

土壤酶活性测定: 土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[15-17]。土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[15, 18]。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定^[15-16, 19]。土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[15-16, 20]。

1.4 经济效益

本研究以不施用菌肥和腐熟秸秆为零基准, 通过计算增加收入和投入来计算各处理的经济效益。

(1) 投入 (I): 投入包括菌肥 (3.0 元 · kg⁻¹) 和腐熟秸秆 (0.5 元 · kg⁻¹)、种子、肥料、灌溉、除草、机械、田间管理、收获以及各阶段的人工费用 (除菌肥和腐熟秸秆费用外, 其他投入按 5000 元 · hm⁻²)。

(2) 产出 (O): 产出主要包括籽粒产量 (单

价: 5.0 元 · kg⁻¹) 和饲草产量 (单价: 2.5 元 · kg⁻¹)。

(3) 经济效益 (E): $E = O - I$ 。

1.5 数据处理

原始数据采用 Excel 2010 和 R Studio 进行分析 and 绘图。方差分析采用 R Studio 中的 lmer() 和 aov() 函数进行数据分析, 相关性分析热图采用 R Studio 中的 corrplot() 函数、主成分分析采用 R Studio 中的 fviz_pca_biplot() 函数进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 有机物料对盐碱地土壤 pH 的影响

2016、2017 和 2018 年各时期不同土层土壤 pH 在各改良处理条件下均有所降低, S 和 FS 处理 0 ~ 40 cm 土层土壤 pH 均显著低于 CK 处理 (图 2)。其中, 2016 年 F、S、FS 处理下土壤 pH 均较 CK 处理分别在 0 ~ 5 cm 土层降低 2.31%、4.04%、3.27%, 在 5 ~ 10 cm 土层降低 0.49%、4.77%、3.01%, 在 10 ~ 20 cm 土层降低 -2.38%、3.75%、1.43%, 在 20 ~ 40 cm 土层降低 -2.26%、4.95%、2.85%。2017 年 F、S、FS 处理下土壤 pH 均较 CK

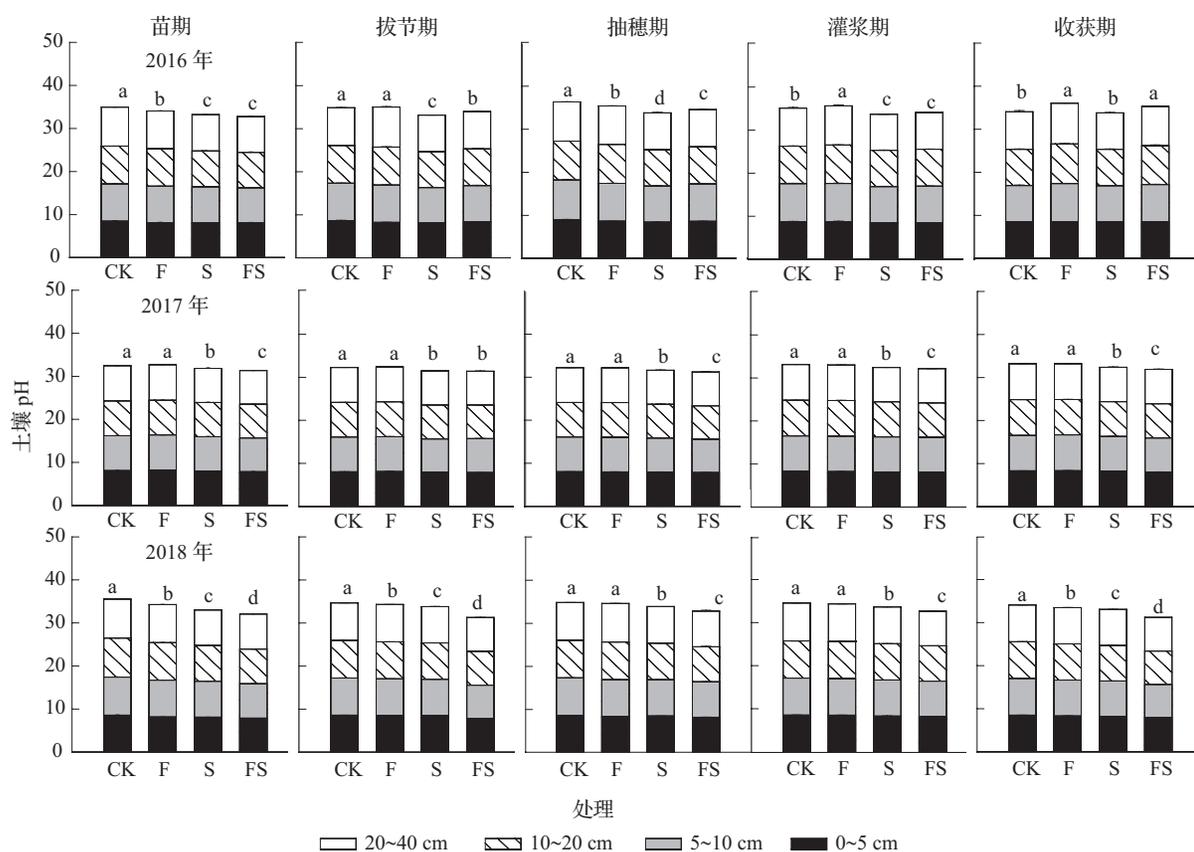


图 2 2016 ~ 2018 年有机物料对土壤 pH 的影响

注: 图柱上不同小写字母代表各处理 0 ~ 40 cm 土层平均数值的差异显著 (P < 0.05)。下同。

处理分别在 0 ~ 5 cm 土层降低 -0.20%、1.51%、2.71%，在 5 ~ 10 cm 土层降低 -0.52%、1.90%、3.02%，在 10 ~ 20 cm 土层降低 0.12%、2.13%、3.44%，在 20 ~ 40 cm 土层降低 -0.02%、2.97%、3.68%。2018 年 F、S、FS 处理下土壤 pH 均较 CK 处理分别在 0 ~ 5 cm 土层降低 2.29%、2.90%、6.73%，在 5 ~ 10 cm 土层降低 1.87%、3.47%、7.70%，在 10 ~ 20 cm 土层降低 1.29%、3.90%、8.37%，在 20 ~ 40 cm 土层降低 0.77%、4.13%、8.56%。经过 3 年连续改良，以 S 和 FS 处理的土壤 pH 降低显著，S 处理各土层土壤 pH 均值低于 8.5，FS 处理各土层土壤 pH 均值低于 8.0。

2.2 有机物料对盐碱地土壤电导率的影响

经过 3 年的改良，2016 ~ 2018 年各土层土壤 EC 均较改良前明显降低 (图 3)。随着改良年限的增加，各处理及各土层土壤 EC 逐渐降低，除 FS 处理，在改良第 3 年收获期各土层土壤 EC 显著高于其他处理。改良 3 年期间施腐熟秸秆与菌肥后，

每年苗期时，改良处理各土层土壤 EC 显著被提高，尤以 FS 处理最为显著。2016 年 F、S、FS 处理下土壤 EC 均较 CK 处理分别在 0 ~ 5 cm 土层提高 107.08%、141.08%、147.01%，在 5 ~ 10 cm 土层提高 22.57%、153.86%、98.38%，在 10 ~ 20 cm 土层提高 14.35%、146.13%、57.57%，在 20 ~ 40 cm 土层提高 9.56%、146.82%、112.26%。2017 年 F、S、FS 处理下土壤 EC 均较 CK 处理分别在 0 ~ 5 cm 土层提高 21.27%、18.54%、47.68%，在 5 ~ 10 cm 土层提高 26.39%、53.01%、122.20%，在 10 ~ 20 cm 土层提高 33.56%、99.57%、158.64%，在 20 ~ 40 cm 土层提高 8.05%、82.61%、203.87%。2018 年 F、S、FS 处理下土壤 EC 均较 CK 处理分别在 0 ~ 5 cm 土层提高 37.45%、15.63%、136.21%，在 5 ~ 10 cm 土层提高 8.17%、0.03%、199.69%，在 10 ~ 20 cm 土层提高 4.28%、473%、248.88%，在 20 ~ 40 cm 土层提高 7.06%、9.30%、233.28%。

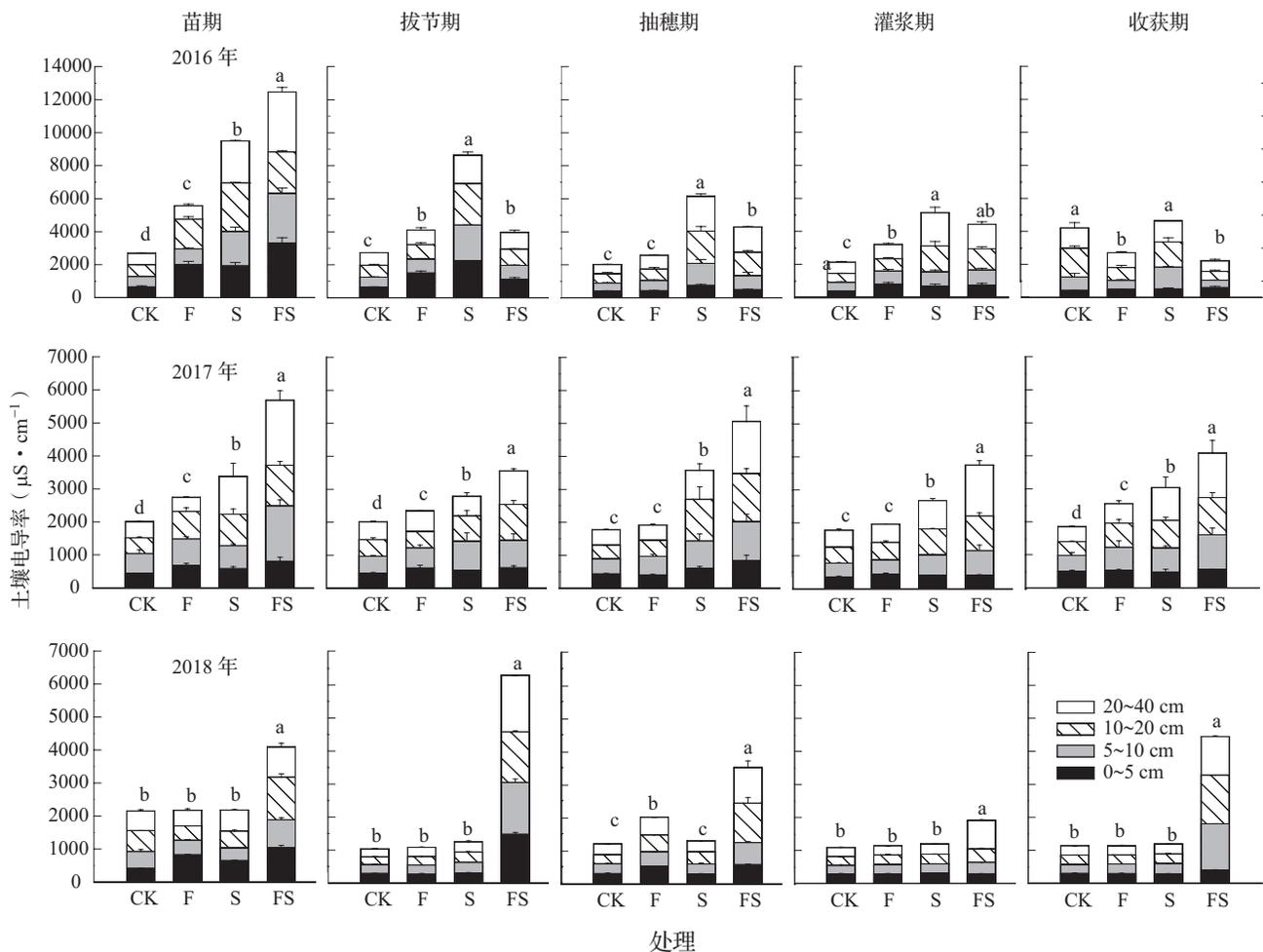


图 3 2016 ~ 2018 年有机物料对土壤电导率的影响

2.3 有机物料对盐碱地土壤微生物生物量碳含量的影响

由图 4 可知, 随着改良年限的增加, 改良处理土壤 MBC 含量逐渐增加, 而 CK 处理逐渐降低。随燕麦生育时期的推进, 各处理下不同土层土壤 MBC 含量均先增加后降低, 2016 ~ 2017 年在燕麦抽穗期达最高, 2018 年在拔节期表现最高, 以 0 ~ 40 cm 最为显著。2016 年抽穗期 F、

S、FS 处理下各土层土壤 MBC 含量分别较 CK 处理显著提高 39.40% ~ 135.92%、34.33% ~ 111.90%、7.06% ~ 151.46%; 2017 年抽穗期 F、S、FS 处理下土壤 MBC 含量分别较 CK 处理显著提高 23.60% ~ 109.96%、17.81% ~ 115.84%、15.38% ~ 103.66%; 2018 年抽穗期 F、S、FS 处理下各土层土壤 MBC 含量分别较 CK 处理显著提高 23.60% ~ 109.96%、17.81% ~ 115.84%、15.38% ~ 103.66%。

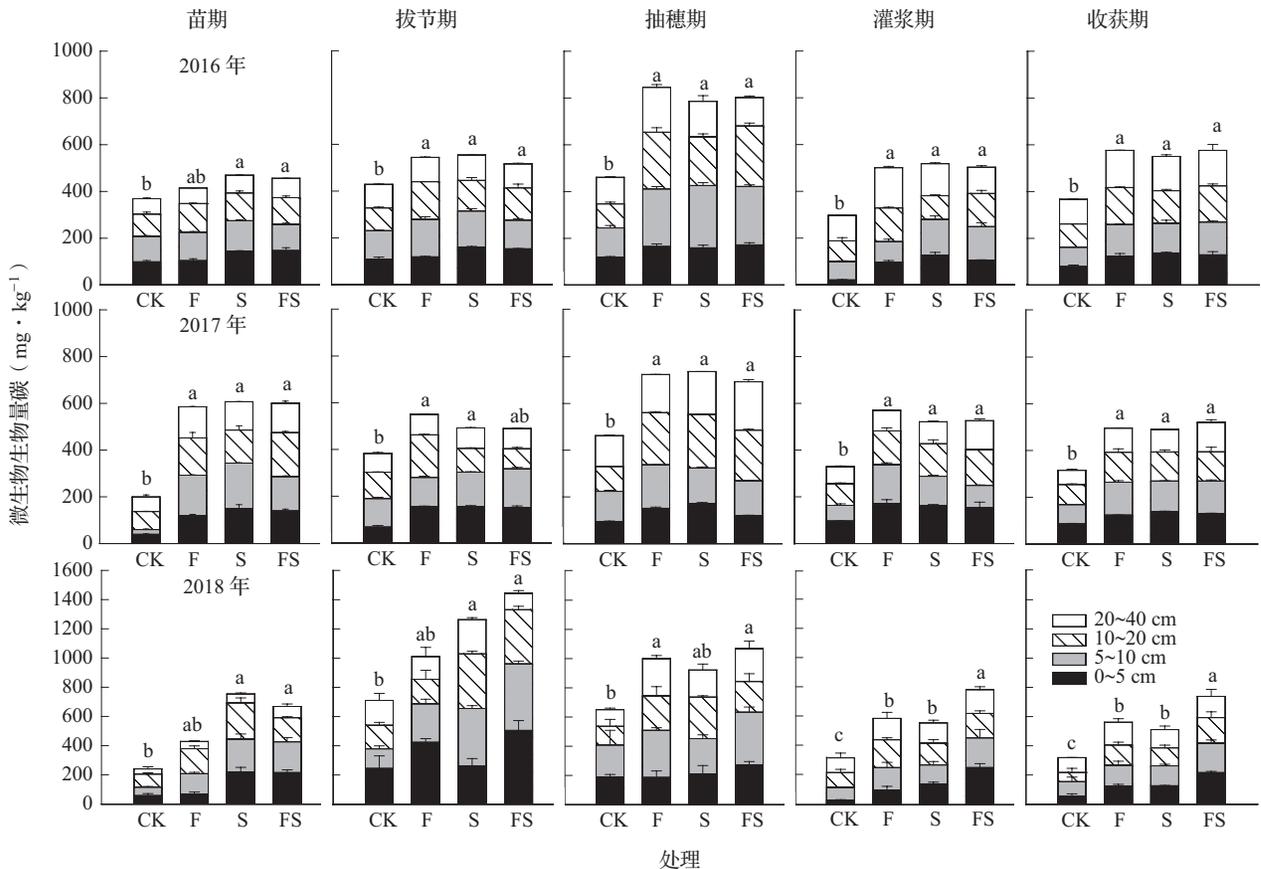


图 4 2016 ~ 2018 年有机物料对土壤微生物生物量碳含量的影响

2.4 有机物料对盐碱地土壤微生物生物量氮含量的影响

由图 5 可知, 随着改良年限的增加, 第 2 年改良处理下土壤 MBN 含量最高。随燕麦生育时期的推进, 各处理在不同土层土壤 MBN 含量均先增加后降低, 在燕麦抽穗期达最高, 以 0 ~ 40 cm 最为显著。2016 年抽穗期 F、S、FS 处理下各土层 MBN 含量分别较 CK 处理显著提高 31.27% ~ 63.67%、43.63% ~ 65.43%、45.84% ~ 97.86%; 2017 年抽穗期 F、S、FS 处理下各土层土壤 MBN 含量分别较 CK 处理显著提高 -45.56% ~ 676.93%、47.77% ~ 636.61%、31.57% ~ 700.89%; 2018 年抽穗期 F、

S、FS 处理下各土层土壤 MBN 含量分别较 CK 处理显著提高 3.75% ~ 140.20%、4.36% ~ 288.38%、40.26% ~ 357.07%。

2.5 有机物料对盐碱地土壤微生物生物量磷含量的影响

由图 6 可知, 随着改良年限的增加, 第 2 年改良处理下土壤 MBP 含量最低。随燕麦生育时期的推进, 各处理在不同土层土壤 MBP 含量均先增加后降低, 在燕麦生长旺盛时期达最高, 且以 0 ~ 40 cm 最为显著。2016 年拔节期 F、S、FS 处理下各土层土壤 MBP 含量分别较 CK 处理显著提高 20.96% ~ 193.53%、8.62% ~ 114.37%、-9.74% ~

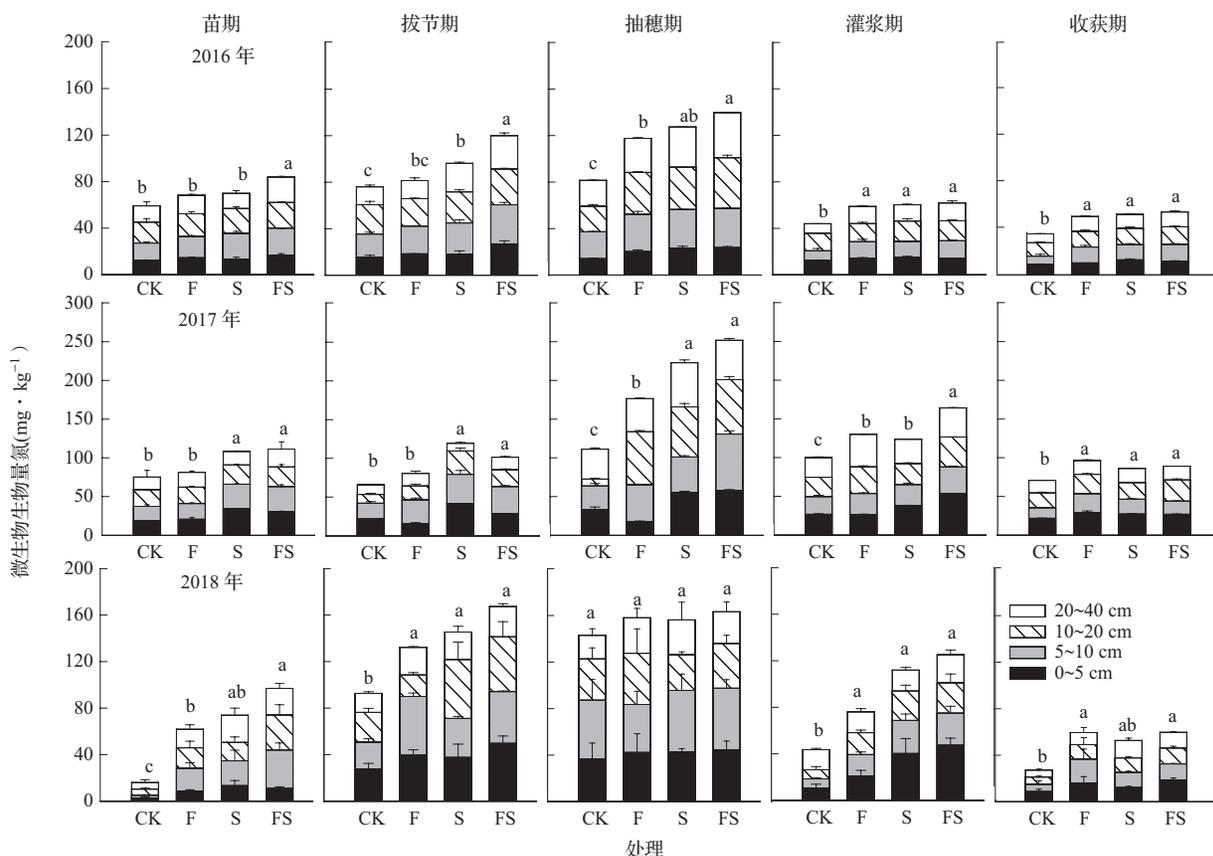


图5 2016 ~ 2018 年有机物料对土壤微生物生物量氮含量的影响

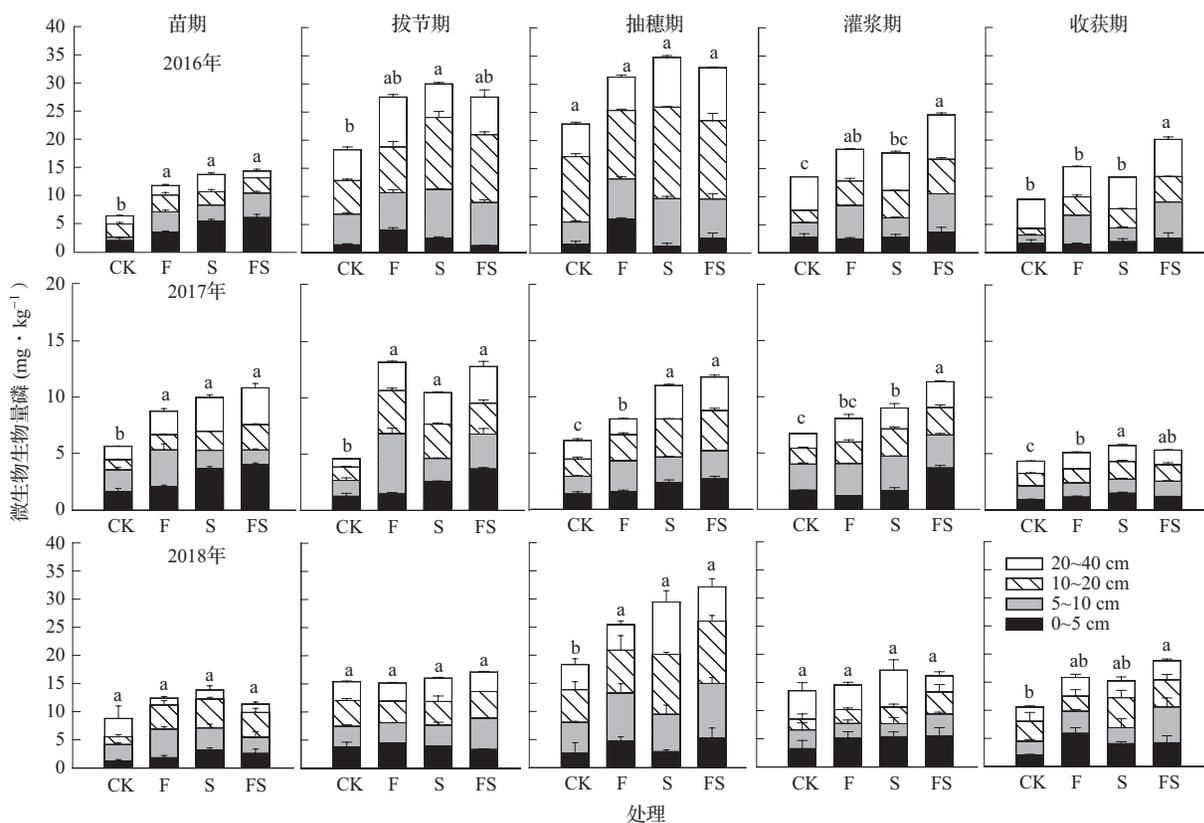


图6 2016 ~ 2018 年有机物料对土壤微生物生物量磷含量的影响

102.14%；2017年抽穗期F、S、FS处理下各土层土壤MBP含量分别较CK处理显著提高-14.73%~73.95%、44.85%~122.22%、59.14%~133.76%；2018年抽穗期F、S、FS处理下各土层土壤MBP含量分别较CK处理显著提高53.82%~213.19%、30.93%~276.21%、3.16%~357.07%。

2.6 有机物料对盐碱地土壤蔗糖酶活性的影响

由图7可知，随着改良年限的增加，第2年改良处理后土壤蔗糖酶活性最高。各处理在0~40 cm土层土壤蔗糖酶活性均随年份和燕麦生育时期有

显著变化，均以苗期含量较高。2016年苗期F、S、FS处理下各土层土壤蔗糖酶活性分别较CK处理显著提高59.08%~109.32%、31.98%~157.53%、58.37%~220.52%；2017年苗期F、S、FS处理下各土层土壤蔗糖酶活性分别较CK处理分别显著提高-0.10%~52.39%、43.92%~86.87%、-5.82%~33.86%；2018年苗期F、S、FS处理下各土层土壤蔗糖酶活性分别较CK处理显著提高-7.68%~23.12%（不显著）、11.11%~54.39%、2.94%~125.78%。

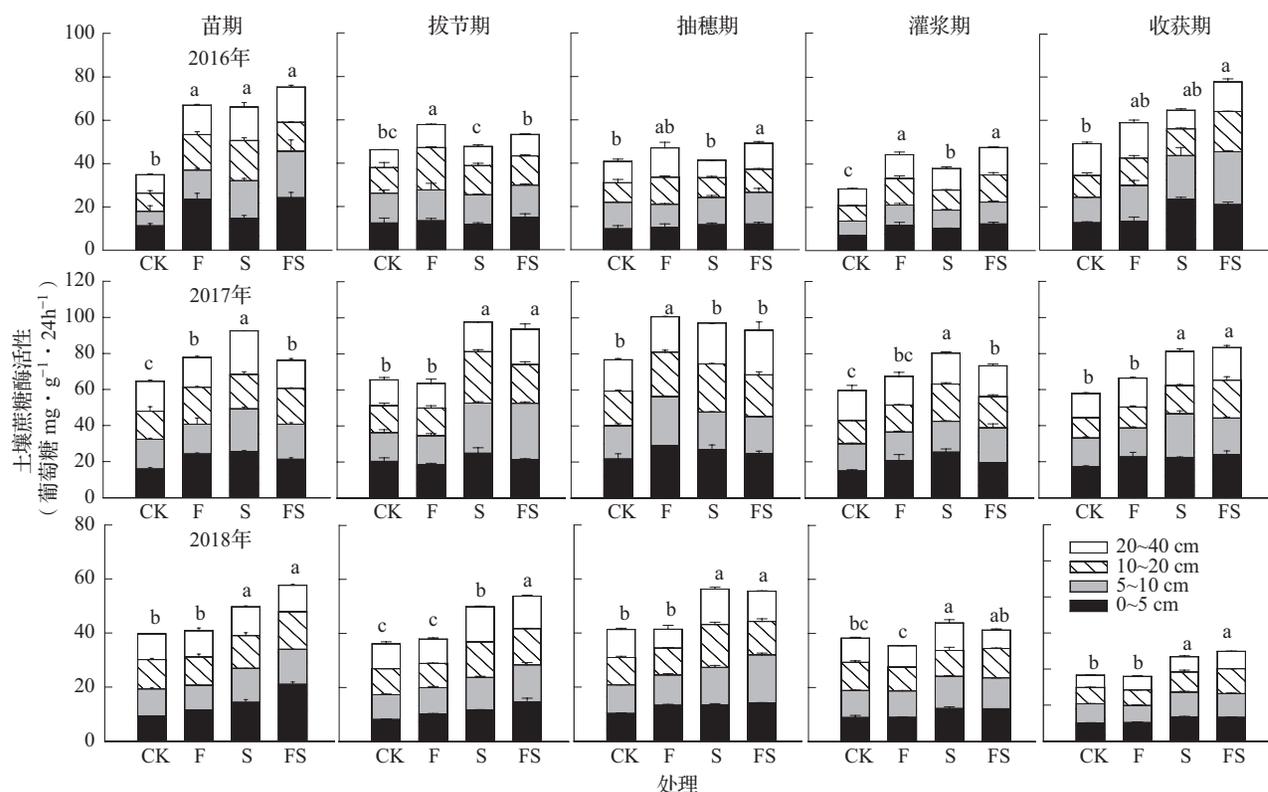


图7 2016~2018年有机物料对土壤蔗糖酶活性的影响

2.7 有机物料对盐碱地土壤脲酶活性的影响

由图8可知，随着改良年限的增加，第2年改良处理下土壤脲酶活性最高。随燕麦生育时期的推进，2016~2017年0~40 cm土层土壤脲酶活性逐渐增加，2018年土壤脲酶活性先增加后降低，而且各处理在苗期均显著提高土壤脲酶活性。2016年苗期F、S、FS处理下各土层土壤脲酶活性均较CK处理分别提高4.88%~43.52%、12.78%~67.14%、35.40%~66.00%；2017年苗期F、S、FS处理下各土层土壤脲酶活性分别较CK处理显著提高-1.49%~13.61%、2.08%~6.96%、0.28%~8.88%；2018年F、S、FS处理下各土层土壤脲酶活性分别较CK处理显著提高14.18%~38.03%、

16.30%~63.82%、28.83%~116.35%。

2.8 有机物料对盐碱地土壤碱性磷酸酶活性的影响

由图9可知，随着改良年限的增加，各处理下土壤碱性磷酸酶活性逐渐降低。2016、2017和2018年0~40 cm土层土壤碱性磷酸酶活性在生育时期无显著变化，而且各处理在苗期均显著提高土壤碱性磷酸酶活性。2016年苗期F、S、FS处理下各土层土壤碱性磷酸酶活性分别较CK处理显著提高-1.50%~14.41%、16.62%~68.57%、43.54%~61.24%；2017年苗期F、S、FS处理下各土层土壤碱性磷酸酶活性分别较CK处理显著提高3.63%~6.93%、5.30%~22.92%、5.51%~16.14%；2018年苗期F、S、FS处理下各土层土壤碱性磷酸

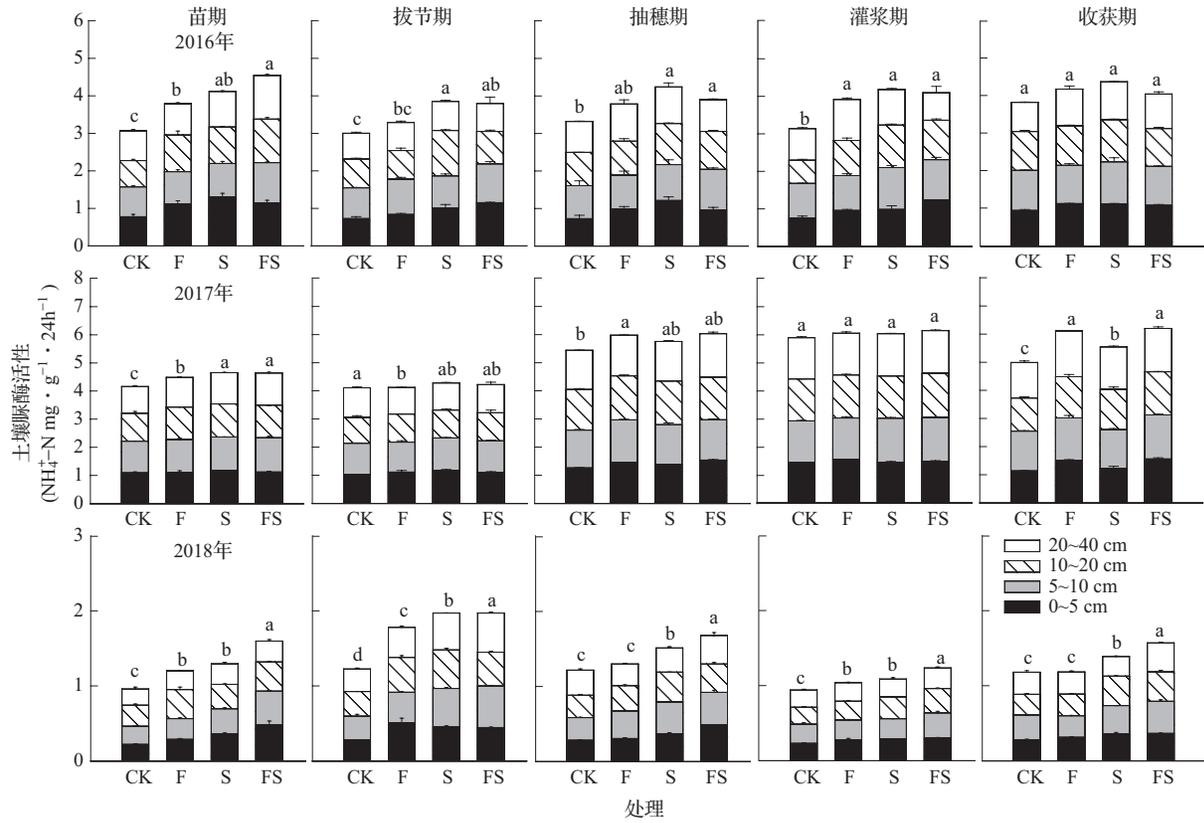


图8 2016 ~ 2018年有机物料对土壤脲酶活性的影响

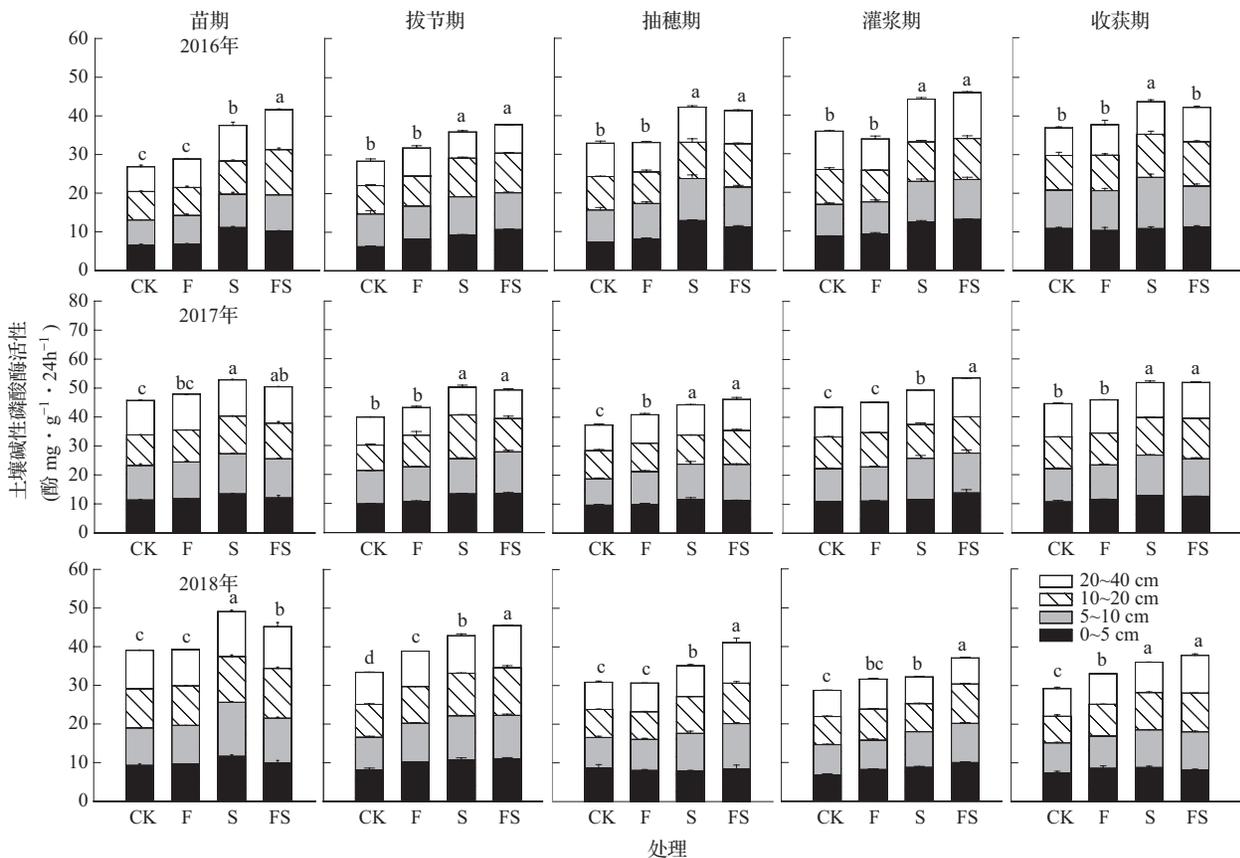


图9 2016 ~ 2018年有机物料对土壤碱性磷酸酶活性的影响

酶活性分别较 CK 处理显著提高 -5.85% ~ 3.64%、16.76% ~ 44.55%、7.25% ~ 26.99%。

2.9 有机物料对燕麦籽粒和饲草产量的影响及经济效益分析

2016 ~ 2018 年盐碱地定位改良期间, 施用菌肥和腐熟秸秆可以显著提高燕麦收获期籽粒、灌浆期鲜草和干草产量 (表 2)。2016、2017、2018 年改良措施 (F、S、FS) 的籽粒产量分别较 CK 处理显著提高 47.55% ~ 121.48%、19.50% ~ 146.06% 和 35.24% ~ 61.85%。2016、2017、2018 年改良

措施 (F、S、FS) 的鲜草产量分别较 CK 处理提高 -4.16% ~ 65.97%、56.13% ~ 104.60% 和 -4.28% ~ 33.61%。2016、2017、2018 年改良措施 (F、S、FS) 的干草产量分别较 CK 处理提高 10.83% ~ 48.22%、36.77% ~ 77.33% 和 37.82% ~ 66.28%。3 年改良中, FS 处理的籽粒、鲜草和干草产量均有显著提高, 分别在 2016 年提高 121.48%、65.97%、48.22%; 在 2017 年提高 146.06%、102.13%、77.23%; 在 2018 年提高 36.55%、23.53%、43.20%。F 处理在第 2 年和第 3 年表现最好, 且与 FS 处理差异不显著。

表 2 2016 ~ 2018 年不同改良处理对燕麦产量的影响 (kg · hm⁻²)

年份	处理	籽粒产量	鲜草产量	干草产量
2016	CK	451.1 ± 75.1c	17170.4 ± 1161.9b	7584.2 ± 228.7b
	F	665.6 ± 58.9b	19747.5 ± 3828.2b	8473.9 ± 1629.8b
	S	875.6 ± 25.2ab	16455.7 ± 1612.8b	8405.4 ± 852.4b
	FS	999.1 ± 19.6a	28497.7 ± 1989.8a	11241.1 ± 740.8a
2017	CK	694.9 ± 79.6c	15305.0 ± 917.6c	5469.3 ± 160.5c
	F	1184.0 ± 156.4a	31313.9 ± 2137.0a	9698.9 ± 648.7a
	S	830.4 ± 38.0b	23895.9 ± 2039.7b	7480.2 ± 555.3b
	FS	1709.9 ± 90.8a	30935.3 ± 2091.1a	9693.2 ± 676.1a
2018	CK	769.3 ± 62.7c	21658.7 ± 478.9b	6296.0 ± 2725.0b
	F	1245.1 ± 168.5a	28938.7 ± 4081.9a	10468.7 ± 2704.7a
	S	1040.4 ± 61.0b	20732.7 ± 1929.3b	8677.3 ± 683.2ab
	FS	1050.5 ± 16.9ab	26755.3 ± 3012.6a	9016.0 ± 474.4a

注: 同一年份同列数据后不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

根据对本研究所投入和产出进行效益分析 (表 3), 各改良措施中的经济效益以 F 处理表现较好, 在 2017 和 2018 年表现较好, 每公顷较 CK 处理分

别增收 7297、7121 元; 其次为 FS 处理, 在 2016 和 2017 年表现较高, 每公顷较 CK 处理增收 387、2972 元。本研究认为, F 处理主要通过提高燕麦籽粒产

表 3 2016 ~ 2018 年燕麦各处理经济效益分析 (元 · hm⁻²)

年份	处理	投入				产出	经济效益	增收效益
		人工 + 种子 + 燃油等	菌肥	腐熟秸秆	总投入			
2016	CK	5000	0	0	5000	20088	15088	0
	F	5000	4500	0	9500	22849	13349	-1739
	S	5000	0	5625	10625	23203	12578	-2511
	FS	5000	4500	5625	15125	30600	15475	387
2017	CK	5000	0	0	5000	15410	10410	0
	F	5000	4500	0	9500	27207	17707	7297
	S	5000	0	5625	10625	20776	10151	-259
	FS	5000	4500	5625	15125	28508	13383	2972
2018	CK	5000	0	0	5000	17663	12663	0
	F	5000	4500	0	9500	29284	19784	7121
	S	5000	0	5625	10625	24294	13669	1006
	FS	5000	4500	5625	15125	25166	10041	-2622

量,提高其经济效益;FS处理主要通过提高燕麦的干草产量,提升其饲草价值,提高燕麦的经济效益。

2.10 主成分分析

2016~2018年土壤pH、EC、MBC、MBN、MBP、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶及燕麦产量之间的成分分析显示(图10,表4),2016和2017年第一主成分贡献度较强的因子有分布在CK和F

处理的土壤pH和分布在S和FS处理的土壤EC、MBC、MBN、MBP、脲酶、碱性磷酸酶及籽粒产量,而第二主成分贡献度较高的因子是分布在S和FS处理的土壤蔗糖酶;2018年第一主成分贡献度较强的因子有分布在CK处理的土壤pH和分布在FS处理的土壤EC、MBC、MBN、MBP、蔗糖酶、脲酶及碱性磷酸酶。

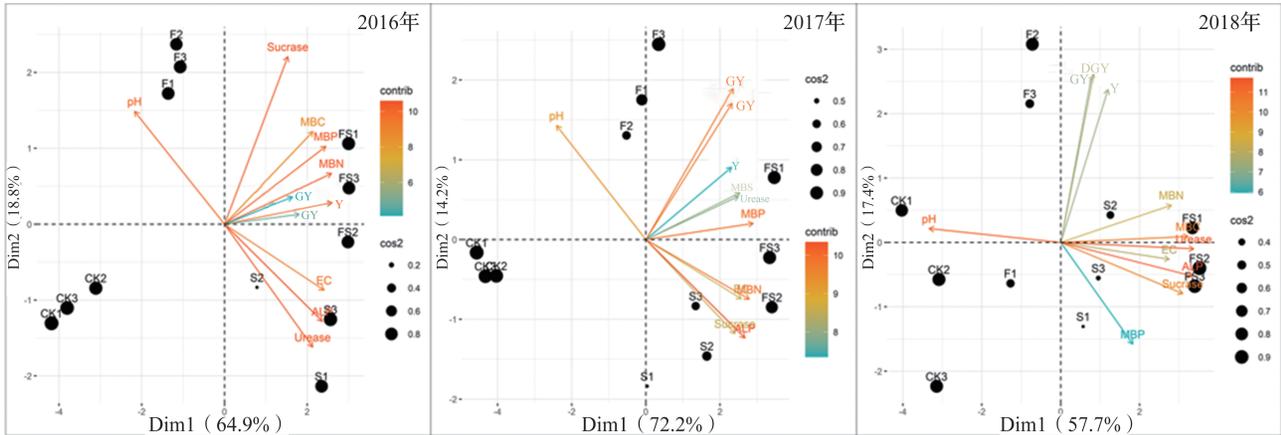


图10 2016、2017、2018年土壤特性与产量之间的成分分析

注: Sucrase、Urease、ALP、GY、FGY和DGY分别代表土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、燕麦籽粒产量、鲜草产量和干草产量,下同。contrib表示土壤指标对主成分的贡献率,cos2表示各处理产量指标在主成分坐标系统中的重量。

表4 2016、2017、2018年土壤指标对各主成分的贡献度

土壤指标	2016年			2017年			2018年		
	Dim1	Dim2	Dim3	Dim1	Dim2	Dim3	Dim1	Dim2	Dim3
pH	-0.80	0.55	0.19	-0.80	0.55	0.19	-0.97	0.06	-0.12
EC	0.88	-0.32	-0.30	0.88	-0.32	-0.30	0.80	-0.08	0.32
MBC	0.79	0.45	-0.40	0.79	0.45	-0.40	0.94	0.03	0.01
MBN	0.95	0.25	0.01	0.95	0.25	0.01	0.82	0.17	-0.44
MBP	0.90	0.38	-0.17	0.90	0.38	-0.17	0.53	-0.46	0.15
Sucrase	0.56	0.81	-0.08	0.56	0.81	-0.08	0.90	-0.23	0.00
Urease	0.78	0.59	0.05	0.78	0.59	0.05	0.98	-0.03	-0.08
ALP	0.87	0.47	0.00	0.87	0.47	0.00	0.97	-0.15	0.00
GY	0.95	0.10	0.00	0.95	0.10	0.00	0.35	0.69	-0.59
FGY	0.60	0.13	0.75	0.60	0.13	0.75	0.22	0.73	0.41
DGY	0.66	0.05	0.65	0.66	0.05	0.65	0.24	0.76	0.37

2.11 相关性分析

由表5可知,2016年土壤MBN、脲酶、碱性磷酸酶及燕麦籽粒产量与土壤pH呈现显著负相关关系,与土壤EC呈现显著正相关关系;2017年土壤MBN、MBP、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶及燕麦籽粒产量与土壤pH呈显著负相关关系,与土壤EC呈显著正相关关系;2018年土壤MBC、MBN、

蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶与土壤pH呈显著负相关关系,与土壤EC呈显著正相关关系。与此同时,改良3年期间,土壤MBC、MBN、MBP和蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶互相之间均存在显著正相关关系;燕麦籽粒产量和饲草产量均与所测土壤微生物生物量、土壤酶有显著正相关关系,尤其在改良第1年和第2年。随着改良年限的增加,燕麦籽

表 5 2016、2017、2018 年土壤特性与产量之间的相关关系

2016 年	pH	EC	MBC	MBN	MBP	Sucrase	Urease	ALP	GY	FGY	DGY
pH	1										
EC	-0.95 ^{***}	1									
MBC	-0.46	0.67 [*]	1								
MBN	-0.62 [*]	0.73 ^{**}	0.85 ^{***}	1							
MBP	-0.54	0.73 ^{**}	0.93 ^{***}	0.94 ^{***}	1						
Sucrase	-0.02	0.27	0.84 ^{***}	0.72 ^{**}	0.82 ^{**}	1					
Urease	-0.92 ^{***}	0.86 ^{***}	0.33	0.60 [*]	0.47	-0.03	1				
ALP	-0.93 ^{***}	0.9 ^{***}	0.47	0.73 ^{**}	0.61 [*]	0.1	0.97 ^{***}	1			
GY	-0.71 ^{**}	0.79 ^{**}	0.77 ^{**}	0.95 ^{***}	0.89 ^{***}	0.59 [*]	0.66 ^c	0.77 ^{**}	1		
FGY	-0.26	0.26	0.22	0.62 [*]	0.47	0.39	0.44	0.46	0.61 [*]	1	
DGY	-0.39	0.4	0.32	0.62 [*]	0.49	0.37	0.51	0.53	0.6 [*]	0.8 ^{**}	1
2017 年	pH	EC	MBC	MBN	MBP	Sucrase	Urease	ALP	GY	FGY	DGY
pH	1										
EC	-0.93 ^{***}	1									
MBC	-0.46	0.56	1								
MBN	-0.84 ^{**}	0.82 ^{**}	0.79 ^{**}	1							
MBP	-0.73 ^{**}	0.77 ^{**}	0.88 ^{***}	0.92 ^{***}	1						
Sucrase	-0.77 ^{**}	0.69 [*]	0.77 ^{**}	0.85 ^{***}	0.81 ^{**}	1					
Urease	-0.58 [*]	0.63 [*]	0.68 [*]	0.84 ^{***}	0.85 ^{***}	0.48	1				
ALP	-0.92 ^{***}	0.85 ^{***}	0.71 ^{**}	0.96 ^{***}	0.86 ^{***}	0.92 ^{***}	0.67 [*]	1			
GY	-0.58 [*]	0.77 ^{**}	0.56	0.64 [*]	0.69 [*]	0.32	0.76 ^{**}	0.54	1		
FGY	-0.38	0.54	0.79 ^{**}	0.55	0.81 ^{**}	0.47	0.65 [*]	0.47	0.72 ^{**}	1	
DGY	-0.36	0.52	0.75 ^{**}	0.52	0.78 ^{**}	0.41	0.66 [*]	0.43	0.74 ^{**}	0.99 ^{***}	1
2018 年	pH	EC	MBC	MBN	MBP	Sucrase	Urease	ALP	GY	FGY	DGY
pH	1										
EC	-0.91 ^{***}	1									
MBC	-0.88 ^{***}	0.66 [*]	1								
MBN	-0.70 [*]	0.46	0.74 ^{**}	1							
MBP	-0.45	0.36	0.49	0.41	1						
Sucrase	-0.89 ^{***}	0.67 [*]	0.86 ^{***}	0.67 [*]	0.43	1					
Urease	-0.94 ^{***}	0.75 ^{**}	0.92 ^{***}	0.80 ^{**}	0.47	0.88 ^{***}	1				
ALP	-0.94 ^{***}	0.76 ^{**}	0.92 ^{***}	0.73 ^{**}	0.55	0.95 ^{***}	0.96 ^{***}	1			
GY	-0.23	0.1	0.31	0.63 [*]	-0.18	0.1	0.36	0.23	1		
FGY	-0.21	0.29	0.14	0.25	0.04	-0.04	0.1	0.05	0.36	1	
DGY	-0.19	0.09	0.36	0.09	-0.21	0.11	0.24	0.18	0.34	0.56	1

注: *、**、*** 分别代表在 0.05、0.01、0.001 水平上相关显著。

粒产量对于土壤 pH 的负效应逐渐减弱, 且对于土壤生物学特性的正效应也逐渐减弱。

3 讨论

土壤酸碱度和盐度是评价盐碱土壤健康的重要指标。通过 3 年有机物料的定位改良, 本研究认为 F、S 及 FS 处理均较 CK 处理可以显著降低各时期 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层土壤 pH, 以添加腐熟秸秆的改良方式效果最为显著, 前人研究结果一致认为, 菌肥^[21]和腐熟秸秆^[22]均可以显著降低土壤 pH, 由于菌肥和腐熟秸秆本身为酸性物质, 可中和土壤碱性。随着改良年限的增加, 土壤 EC 逐渐降低, 但同一时期, S 处理会显著提高土壤 EC, 尤其是 FS 处理, 可能是因为土壤碱性减弱, 溶解性离子含量增加, 致使土壤 EC 随着土壤钾离子含量增多而升高^[10]。

土壤 MBC、MBN、MBP 含量和土壤酶活性在很大程度上制约着土壤肥力和耕地质量, 其与土壤 pH 和 EC 密切相关, 对外界环境变化的反映十分敏感^[23-24]。本研究在改良过程中, 土壤 MBC、MBN、MBP 含量均在燕麦生长旺期达最高^[7], 且以 0 ~ 20 cm 土层最为明显。F、S 及 FS 处理较 CK 处理相比, 均可以显著提高燕麦各时期不同土层 MBC、MBN、MBP 含量以及土壤酶活性, 可能是因为施用腐熟秸秆与菌肥可以降低土壤 pH, 增加土壤有机质, 从而增强土壤养分循环和物质转化能力, 以达到燕麦增产的目的。土壤 MBC、MBN 是土壤微生物本身所含的碳、氮含量, 由于菌肥本身富含微生物, 可以提高土壤微生物数量, 优化土壤微生物种群结构^[24], 富含有机质的腐熟秸秆结合施用菌肥可以为微生物提供大量的碳源和氮源, 有助于土壤外援微生物和土著微生物生长^[25-26]; 反之, 微生物可以分解有机质, 为植物生长所需提供充足的养分, 在土壤碳、氮循环中起重要作用^[27]。

土壤酶来源于土壤微生物、植物根系和土壤动物^[28-30], 其参与土壤中众多生物化学反应及养分循环过程, 成为土壤中活跃的有机成分之一^[31], 可以反映出土壤中生物代谢和物质转化的动态情况及其程度, 以及不同土壤管理措施下土壤质量变化, 已被称作为土壤健康的敏感性指标, 在土壤生态系统中发挥至关重要的作用^[32-33]。大量研究得出相似结论, 在盐碱地条件下, 施用菌肥、腐熟秸秆及配施均可以不同程度提高土壤蔗糖酶、脲酶

及碱性磷酸酶活性^[7, 12, 34], 且深层土壤酶活性较低^[35]。而提高土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性有利于碳水化合物转化、有机氮转化成无机氮、有机磷转化成无机磷, 为植物和微生物提供能源, 可以供植物吸收利用^[36]。

2016 ~ 2018 年燕麦籽粒产量和饲草产量均与所测土壤微生物生物量、土壤酶有显著正相关关系, 尤其在改良第 1 年和第 2 年, 且取得良好的经济效益。随着改良年限的增加, 土壤 pH 和土壤生物学特性对燕麦籽粒产量的影响作用减弱, 说明本研究中提供的改良措施在施用的前 2 年对盐碱土壤特性及燕麦生长的作用效果非常明显。除此之外, 2016、2017、2018 年在 CK 处理贡献较强的土壤 pH 因子和在 S 和 FS 处理下贡献较强的土壤 EC、MBC、MBN、MBP、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶及籽粒产量等因子是土壤改良主要影响的特征参数。不仅如此, 本研究认为土壤 MBC、MBN、MBP 含量和土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶互相之间均存在显著正相关关系, 对燕麦产量有显著促进作用, 而何瑞成等^[8]研究认为土壤酶活性和 MBC、MBN 对水稻生长及产量的影响表现不突出。本研究发现土壤生物循环能力(微生物生物量、土壤酶)及燕麦产量均与土壤 pH 呈显著负相关关系, 与土壤 EC 呈显著正相关关系。因此, 在改良盐碱地过程中, 土壤理化性质的改变显著影响着土壤养分及其循环能力, 其对作物生长产生直接和间接作用。

4 结论

对盐碱地连续 3 年施入有机物料(菌肥单施、腐熟秸秆单施及配施菌肥), 燕麦生长各时期 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层土壤 pH 显著降低, 土壤 MBC、MBN、MBP 含量、土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性以及燕麦收获期籽粒、灌浆期鲜草和干草产量均有显著提高, 且以 FS 处理最佳, 但会造成土壤 EC 较高; 而且盐碱地连续 3 年施入有机物料, 燕麦籽粒产量直接和间接受到土壤理化及生物学特性的影响, 尤其是改良第 1 年和第 2 年。

参考文献:

- [1] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望 [J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 10-27.
- [2] 国家环境保护总局. 一九九七年中国环境状况公报 [N].

- 人民日报, 1998-06-26.
- [3] 王晓峰. 内蒙古盐碱地改良措施方法 [J]. 现代农业, 2013 (3): 77.
- [4] 肖克飏, 吴普特, 雷金银, 等. 不同类型耐盐植物对盐碱地生物改良研究 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (12): 2433-2440.
- [5] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力 [J]. 科学, 2021, 73 (6): 30-34, 2, 4.
- [6] 孙婧, 田永强, 高丽红, 等. 秸秆生物反应堆与菌肥对温室番茄土壤微环境的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (6): 153-164.
- [7] 卢培娜, 刘景辉, 张丰屹. 菌肥及腐熟秸秆还田对盐碱地燕麦土壤特性的影响 [J]. 北方农业学报, 2017, 45 (5): 37-42.
- [8] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响 [J]. 土壤学报, 2018, 55 (3): 774-782.
- [9] 卢培娜, 刘景辉, 张丰屹. 不同改良措施对盐碱地燕麦形态生理及产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (15): 20-25.
- [10] 卢培娜, 刘景辉, 赵宝平, 等. 菌肥与腐熟秸秆对盐碱地土壤盐分及燕麦品质的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (6): 1639-1649.
- [11] 王丹, 赵亚光, 马蕊, 等. 微生物菌肥对盐碱地枸杞土壤改良及细菌群落的影响 [J]. 农业生物技术学报, 2020, 28 (8): 1499-1510.
- [12] 卢培娜, 刘景辉, 赵宝平, 等. 菌肥对盐碱地土壤特性及燕麦根系分泌物的影响 [J]. 作物杂志, 2017 (5): 85-92.
- [13] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19 (6): 703-707.
- [14] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14 (4): 319-329.
- [15] Mi J Z, Gregorich Edward G, Xu S T, et al. Effects of a one-time application of bentonite on soil enzymes in a semi-arid region [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2018, 98 (3): 542-555.
- [16] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-297.
- [17] Johnson J L, Temple K L. Some variables affecting the measurement of "catalase activity" in soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, 28 (2): 207-209.
- [18] Frankeberger W T, Johanson J B. Method of measuring invertase activity in soils [J]. *Plant and Soil*, 1983, 74 (3): 301-311.
- [19] Hoffmann G G, Teicher K. Ein kolorimetrisches verfahren zur bestimmung der ureaseaktivität in Böden [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 1961, 95 (1): 55-63.
- [20] Ahmad I, Cheng Z H, Meng H W, et al. Effect of pepper-garlic intercropping system on soil microbial and bio-chemical properties [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2013, 45 (2): 695-702.
- [21] 时东方, 赵骥民, 任长忠, 等. 吉林省西部地区盐碱地土壤成分研究 [J]. 贵州农业科学, 2010, 38 (8): 127-129.
- [22] 韩晓君, 张先政. 不同作物秸秆腐熟还田对土壤理化性质及作物产量的影响分析 [J]. 安徽农学通报, 2013, 19 (16): 80-82.
- [23] 王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 等. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2022, 49 (2): 807-816.
- [24] 张蕾, 吴文强, 王维瑞, 等. 土壤调理剂及其配施微生物菌肥对设施菜田次生盐渍化土壤改良效果研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (3): 264-271.
- [25] 梁川. 菌肥对复垦土壤中酶活性和微生物生物量碳氮的影响 [J]. 农业与技术, 2014, 34 (2): 28, 72.
- [26] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响 [J]. 水土保持研究, 2012, 19 (6): 13-18.
- [27] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (8): 979-988.
- [28] Dick R P, Rasmussen P E, Kerle E A. Influence of long-term residue management on soil enzyme activities in relation to soil chemical properties of a wheat-fallow system [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 6 (2): 159-164.
- [29] Crecchio C, Curci M, Mininni R, et al. Short-term effects of municipal solid waste compost amendments on soil carbon and nitrogen content, some enzyme activities and genetic diversity [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34 (5): 311-318.
- [30] Dick Richard P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1992, 40 (1-4): 25-36.
- [31] Acosta-Martinez V, Moore-Kucera J, Cotton J, et al. Soil enzyme activities during the 2011 Texas record drought/heat wave and implications to biogeochemical cycling and organic matter dynamics [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75: 43-51.
- [32] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18 (3): 229-238.
- [33] Staunton S, Razzouk R, Abadie J, et al. Water-extractable soil organic matter inhibits phosphatase activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55: 14-16.
- [34] 桓明辉, 李杨, 刘晓辉, 等. 秸秆生物菌肥对保护地土壤微生物和土壤酶活性的影响 [J]. 山东农业科学, 2013, 45 (1): 107-109.
- [35] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (3): 522-528.
- [36] Das S K, Varma A. Role of enzymes in maintaining soil health, in soil enzymology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. 25-42.

Effects of organic materials on soil properties and oat yields in a saline-alkaline environment in northern China

LU Pei-na^{1, 2}, LIU Jing-hui^{1*}, LI Li-jun¹, BAI Jian-hui¹, ZHAO Bao-ping¹, MI Jun-zhen¹, LIU Min³ (1. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 2. Gansu Agricultural University/State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzou Gansu 730000; 3. Ordos Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Ordos Inner Mongolia 017000)

Abstract: In order to explore the effects of organic materials on the saline-alkaline soil physicochemical and biological properties, the experiment was continuously conducted in the saline-alkaline environment of Hailiutu site of Inner Mongolia Agricultural University from 2016 to 2018. The changes of soil pH, electrical conductivity, the contents of soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus, soil enzyme activities, and oat yields were investigated under four treatments: negative control (CK), bio-fertilizer (F), decomposed straw (S), and decomposed straw combined with bio-fertilizer (FS). The results showed that F, S and FS treatments significantly decreased soil pH in 0 ~ 5, 5 ~ 10, 10 ~ 20 and 20 ~ 40 cm soil layers, as well as significantly increased the contents of soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus, and soil enzyme activities of sucrase, urease and alkaline phosphatase in 2016, 2017 and 2018, and FS treatment performed best, but it caused higher soil conductivity. Compared with the control, the grain yield, fresh grass yield and dry grass yield increased by 121.48%, 65.97% and 48.22% in 2016, and increased by 146.06%, 102.13% and 77.23% in 2017, and increased by 36.55%, 23.53% and 43.20% in 2018, respectively; In 2016 and 2017, the economic benefits of oats improved. In addition, when organic materials were continuously positioning applied to the saline-alkali land, oat grain yield was directly and indirectly affected by soil physical, chemical and biological properties in 2016, 2017 and 2018.

Key words: saline-alkaline soil; organic materials; soil microbial biomass; soil enzyme activity; oat yields