

磷石膏添加对苏打盐碱稻田耕层土壤肥力和酶活性的影响^①

周妍宏^{1,2}, 刘宏远^{1*}, 王辰², 刘芯彤^{1,3}, 金明姬³

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土地保护与利用全国重点实验室, 长春 130102; 2 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163000; 3 延边大学农学院, 吉林延边 133002)

摘要: 开垦原盐碱荒地作为试验稻田, 设置 4 个磷石膏添加量处理, 分别为 0(CK)、15(G₁₅)、30(G₃₀)和 45 t/hm²(G₄₅), 研究了磷石膏添加对松嫩平原西部苏打盐碱稻田耕层土壤肥力和酶活性的影响。结果表明: ①磷石膏处理(G₁₅、G₃₀和 G₄₅)的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)分别较 CK 处理提高 14.59%~42.86%、14.11%~33.25%、11.62%~26.41%、15.53%~115.47%、0.66%~7.55% 和 4.43%~10.78%, 各指标的最大增幅来自 G₄₅ 处理。②不同种类土壤酶的活性在各处理间差异明显, 脲酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶在 G₄₅ 处理中活性最高, 蔗糖酶在 G₃₀ 处理中活性最高, 纤维素酶在 CK 处理中活性最高; 随着磷石膏添加量的增加, 蔗糖酶和脲酶活性持续增大, 纤维素酶、碱性磷酸酶和亮氨酸氨基肽酶活性先减小后增大, 最小值均出现在 G₁₅ 处理; 土壤酶活性综合指数表现为 G₄₅>CK>G₃₀>G₁₅。③磷石膏添加条件下, TN、SOC、AP 和 TP 含量对酶活性影响最大(Pseudo-*F*≥4.6, *P*<0.05); 磷石膏通过改变 TN 和 SOC 含量间接影响纤维素酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性, 通过改变 TN 含量间接影响蔗糖酶和脲酶活性。综上, 磷石膏添加显著提高苏打盐碱稻田耕层土壤肥力, 进而通过改变 TN 和 SOC 含量间接重塑不同种类土壤酶活性特征及土壤酶综合活性。

关键词: 苏打盐碱稻田; 磷石膏; 土壤肥力; 土壤酶

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Phosphogypsum Addition on Soil Fertility and Enzyme Activity of the Cultivated Layer in Saline-sodic Paddy Fields

ZHOU Yanhong^{1,2}, LIU Hongyuan^{1*}, WANG Chen², LIU Xintong^{1,3}, JIN Mingji³

(1 State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2 College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 3 College of Agriculture, Yanbian University, Yanbian, Jilin 133002, China)

Abstract: Reclaiming the former saline-sodic wasteland as an experimental paddy field, four phosphogypsum addition treatments were set up, namely 0 (CK), 15 (G₁₅), 30 (G₃₀), and 45 t/hm² (G₄₅), to study the effects of phosphogypsum addition on soil fertility and enzyme activity of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields in the western Songnen Plain. The results showed that: 1) The soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), carbon to nitrogen ratio (C/N) and carbon to phosphorus ratio (C/P) of phosphogypsum treatments (G₁₅, G₃₀ and G₄₅) were increased by 14.59%–42.86%, 14.11%–33.25%, 11.62%–26.41%, 15.53%–115.47%, 0.66%–7.55% and 4.43%–10.78%, respectively, compared with CK treatment, with the largest increase all under G₄₅. 2) The activities of soil enzymes were significantly different among different treatments, the activities of urease, leucine aminopeptidase and alkaline phosphatase were highest under G₄₅, the activity of sucrase was highest under G₃₀, and the activity of cellulase was highest under CK. With the increase of phosphogypsum addition, the activities of sucrase and urease continued to increase, while the activities of cellulase, alkaline phosphatase and leucine aminopeptidase first decreased and then increased, and the minimum values all appeared under G₁₅. The geometric mean of enzyme activities was G₄₅>CK>G₃₀>G₁₅. 3) Under phosphogypsum addition condition, the contents of TN,

①基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作高新技术产业专项(2023SYHZ0052)和中国科学院黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28110400)资助。

* 通信作者(liuhongyuan@iga.ac.cn)

作者简介: 周妍宏(1998—), 女, 吉林长春人, 硕士, 主要从事盐碱地土壤改良研究。E-mail: 2110447789@qq.com

SOC, AP and TP had the greatest effects on enzyme activities ($Pseudo-F \geq 4.6$, $P < 0.05$), phosphogypsum indirectly affected the activities of cellulase, leucine aminopeptidase and alkaline phosphatase by changing TN and SOC contents, and the activities of sucrase and urease by changing TN content. Overall, phosphogypsum addition significantly enhances the soil fertility of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields, thereby indirectly reshaping the activity characteristics of different soil enzymes and the geometric mean of enzyme activities by altering TN and SOC contents.

Key words: Saline-sodic paddy fields; Phosphogypsum; Soil fertility; Soil enzyme

中国东北松嫩平原西部面积约 340 万 hm^2 , 是世界三大苏打盐碱地集中分布区之一^[1]。其土壤碱性强、分散性强、通透性差、养分有效性低, 通过盐碱胁迫、渗透胁迫和离子毒害等途径抑制作物生长发育, 造成低产甚至绝收^[2]。基于土壤障碍因子解析并针对性地应用改良措施, 可大幅提高苏打盐碱地粮食产能。作为一种广受认可的改良措施, 添加磷石膏能够明显减轻土壤盐碱障碍, pH、电导率、碱化度、钠吸附比和总碱度可分别降低 1.05 个单位、18.3%、49.1%、66.9% 和 62.2%, 同时为土壤补充硫、锌、铁等营养元素, 提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量^[3-5]。然而, 磷石膏添加对苏打盐碱土酶活性及其与肥力指标之间关联性的影响尚未见明确报道。

土壤酶是由生物体产生的具有高度催化作用的一类蛋白质, 其活性能够反映土壤养分循环的强弱, 是决定土壤质量和生产力的重要指标。酶活性受土壤中盐碱离子浓度影响, 土壤盐碱化程度过高抑制土壤酶活性, 制约土壤肥力提高^[6]。近年来, 随着土壤酶分析技术成熟和成本下降, 盐碱土酶活性及不同改良方式对酶活性的影响受到广泛关注。在天然石膏、秸秆还田、植物改良和有机物料等改良方式下, 盐碱土纤维素酶、蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性可分别提高 3.14%~79.32%、126.67%~900%、3.8%~860%、11.0%~256.67%^[7-10]。可见, 不同改良方式对不同盐碱化程度土壤和不同类型酶活性的影响差别巨大。

土壤酶活性与土壤肥力之间密切相关, 不同酶活性受不同土壤养分类型影响^[11]。转化酶和水解酶等酶类的活性可能受到土壤有机质含量、碳氮物质的周转速率等多种因素影响, 而磷酸酶活性可能受到土壤全磷或有效磷含量影响^[6]。目前众多学者已开展针对不同区域盐碱土酶活性与肥力指标之间的关联性研究。陈孔飞等^[12]探究盐渍化对沙枣林酶活性的影响, 发现土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均与土壤 C/N 呈极显著负相关。王响玲等^[13]采用生物炭改良新疆阿克苏阿拉尔盐渍灰漠土, 通过冗余分析发现土壤胞外酶活性与速效钾、水溶性钾含量及

钠吸附比呈正相关关系且相关性较强。王翊婷等^[14]采用深埋秸秆及淋洗处理改良吉林省白城市苏打盐碱土, 发现土壤纤维素酶、蔗糖酶和脲酶活性与土壤有机质、铵态氮和硝态氮含量呈极显著正相关。

综上, 本研究以松嫩平原西部苏打盐碱土为研究对象, 分析磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性与土壤肥力的变化, 并进一步阐明酶活性与土壤肥力之间的关系, 以期磷石膏改良苏打盐碱稻田提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省大安市牛心套保苇场, 地理坐标 $45^{\circ}13'N \sim 45^{\circ}16'N$, $123^{\circ}13'E \sim 123^{\circ}21'E$, 气候类型为中温带大陆性季风气候, 年平均气温为 4.3°C , 年均降水量为 413.7 mm, 年均潜在蒸发量为 1 696.9 mm, 年无霜期为 137 d。土壤类型为草甸碱土, 砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为 76.80%、18.66% 和 4.54%, 根据 USDA 土壤质地分类标准, 土壤质地为砂质土壤。表层 0~15 cm 土壤 pH 为 10.64, 电导率(EC)为 1.20 mS/cm, 碱化度为 34.05%, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 6.64 g/kg、16.83 mg/kg、24.60 mg/kg 和 71.62 mg/kg。

1.2 试验方法

采用田间试验, 设置 4 个处理, 分别为不施用磷石膏(CK)、施用磷石膏 15 t/ hm^2 (G₁₅)、施用磷石膏 30 t/ hm^2 (G₃₀)、施用磷石膏 45 t/ hm^2 (G₄₅)。每个处理设 3 个重复小区, 共 12 个小区, 每个小区的面积为 100 m^2 。供试磷石膏来自辽宁省黑山县, 主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (纯度>79%), 其中 CaO 32.90 g/kg、 SiO_2 3.29 g/kg、 Fe_2O_3 1.97 g/kg、 P_2O_5 1.63 g/kg, pH 4.19, EC 3.27 mS/cm。

春季解冻前, 按设计量将磷石膏均匀撒施在地表, 解冻后, 旋耕使磷石膏与 0~15 cm 土层充分混匀。种植作物为水稻, 品种为吉宏 6 号, 于 2022 年 5 月 20—25 日插秧, 水稻全生育期氮磷钾肥施用量分别为 N 180 kg/ hm^2 、 P_2O_5 110 kg/ hm^2 、 K_2O 110 kg/ hm^2 ,

水稻生育期内进行正常病虫害防治及肥水调节。因 8 月夏季高温高湿的环境条件下生物活性较高, 于 8 月中旬采集土壤样品。

1.3 土壤样品采集与处理

在每个小区内采用“S”形五点取样法采集 0~15 cm 土壤, 混合均匀, 去除杂物和细根后, 利用四分法取 2 份土壤样品进行风干。一份土壤样品过 100 目筛以测定土壤化学性质, 一份土壤样品过 40 目筛和 60 目筛以测定土壤酶活性。

1.4 测定项目与方法

土壤有机碳(SOC)采用外加热-重铬酸钾滴定法测定, 全氮(TN)采用硫酸-催化剂消解-连续流动分析仪法测定, 全磷(TP)采用硝酸-高氯酸消解-连续流动分析仪法测定, 全钾(TK)采用三酸消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定, 碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定, 有效磷(AP)采用 NaHCO_3 浸提法-连续流动分析仪法测定, 速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定, 具体方法参照鲍士旦^[15]编著的《土壤农化分析》第 3 版。C/N、C/P 和 N/P 均采用质量比, 即 C/N 为 SOC 含量/TN 含量, C/P 为 SOC 含量/TP 含量, N/P 为 TN 含量/TP 含量。

纤维素酶和蔗糖酶活性采用二硝基水杨酸比色法测定, 脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定, 亮氨酸氨基肽酶活性采用亮氨酸对硝基苯胺法测定, 碱性磷酸酶活性采用对硝基苯酚法测定^[16]。土壤酶活性综合指数(Geometric mean of enzyme activities, GME)即求取土壤酶活性的几何平均值以衡量土壤的综合酶活性^[17]。

1.5 数据处理与分析

利用 Excel 2016 录入和整理数据, 利用 SPSS 25.0

进行统计分析, 其中对照与处理之间差异分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA)并进行 Duncan 法多重比较, 显著水平设定为 $P < 0.05$, 利用 Origin 2021 绘制柱状图; 通过 Canoco 5 进行土壤肥力指标与酶活性的冗余分析(RDA); 采用 R 软件中的 plspm 包进行偏最小二乘法(PLS)路径分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力

添加磷石膏影响苏打盐碱稻田耕层 SOC、TN、TP 和 AP 含量, 其含量随着磷石膏添加量的增加而增加(表 1)。添加 15 ~ 45 t/hm² 磷石膏使耕层土壤 SOC、TN、TP 和 AP 含量分别提高 14.59%~42.86%、14.11%~33.25%、11.62%~26.41% 和 15.53%~115.47%, 其中 G₄₅ 处理增幅最大, 但与 G₃₀ 处理无显著差异, 说明磷石膏达到适宜添加量后, 继续增加磷石膏添加量, 将不会显著提高 SOC、TN、TP 和 AP 含量。各处理的 TK、AN 和 AK 含量无显著差异, 说明添加磷石膏对 TK、AN 和 AK 含量无显著影响。

在化学计量比方面, 添加磷石膏影响苏打盐碱稻田耕层 C/N 和 C/P, 且随着磷石膏添加量的增加而提高(表 1)。添加 15 ~ 45 t/hm² 磷石膏使耕层土壤 C/N 和 C/P 分别提高 0.66%~7.55% 和 4.43%~10.78%。其中, G₄₅ 处理的 C/N 增幅最大, 较 CK 处理显著提高 7.55%, 并且与 G₁₅ 和 G₃₀ 处理之间存在显著差异, 说明增加磷石膏添加量有利于提高 C/N。G₄₅ 处理的 C/P 较 CK 处理提高 10.78%, 但与 G₃₀ 处理之间无显著差异, 说明磷石膏达到适宜添加量后, 继续增加磷石膏添加量, 将不会显著提高 C/P。各处理的 N/P 无显著差异, 说明添加磷石膏对 N/P 无显著影响。

表 1 磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤肥力变化

Table 1 Variations in soil fertility of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields under different phosphogypsum addition levels

处理	SOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	TK(g/kg)	AN(mg/kg)
CK	3.03 ± 0.41 c	0.29 ± 0.01 c	0.19 ± 0.02 c	19.67 ± 2.51 a	19.13 ± 1.62 a
G ₁₅	3.54 ± 0.12 bc	0.33 ± 0.01 bc	0.21 ± 0.01 bc	18.80 ± 2.31 a	23.33 ± 5.30 a
G ₃₀	4.43 ± 1.24 ab	0.41 ± 0.09 ab	0.25 ± 0.04 ab	20.77 ± 1.21 a	31.97 ± 5.70 a
G ₄₅	5.04 ± 0.49 a	0.44 ± 0.05 a	0.27 ± 0.02 a	20.81 ± 0.51 a	32.67 ± 14.57 a
处理	AP(mg/kg)	AK(mg/kg)	C/N	C/P	N/P
CK	14.22 ± 0.73 b	104.06 ± 8.91 a	10.56 ± 1.41 b	15.90 ± 1.04 b	1.53 ± 0.12 a
G ₁₅	16.43 ± 2.29 b	103.20 ± 8.78 a	10.63 ± 0.18 b	16.63 ± 1.04 b	1.57 ± 0.08 a
G ₃₀	22.81 ± 1.45 ab	107.64 ± 12.87 a	10.80 ± 0.59 b	17.06 ± 1.65 a	1.64 ± 0.09 a
G ₄₅	30.64 ± 10.21 a	112.03 ± 6.60 a	11.37 ± 0.22 a	18.62 ± 3.38 a	1.63 ± 0.33 a

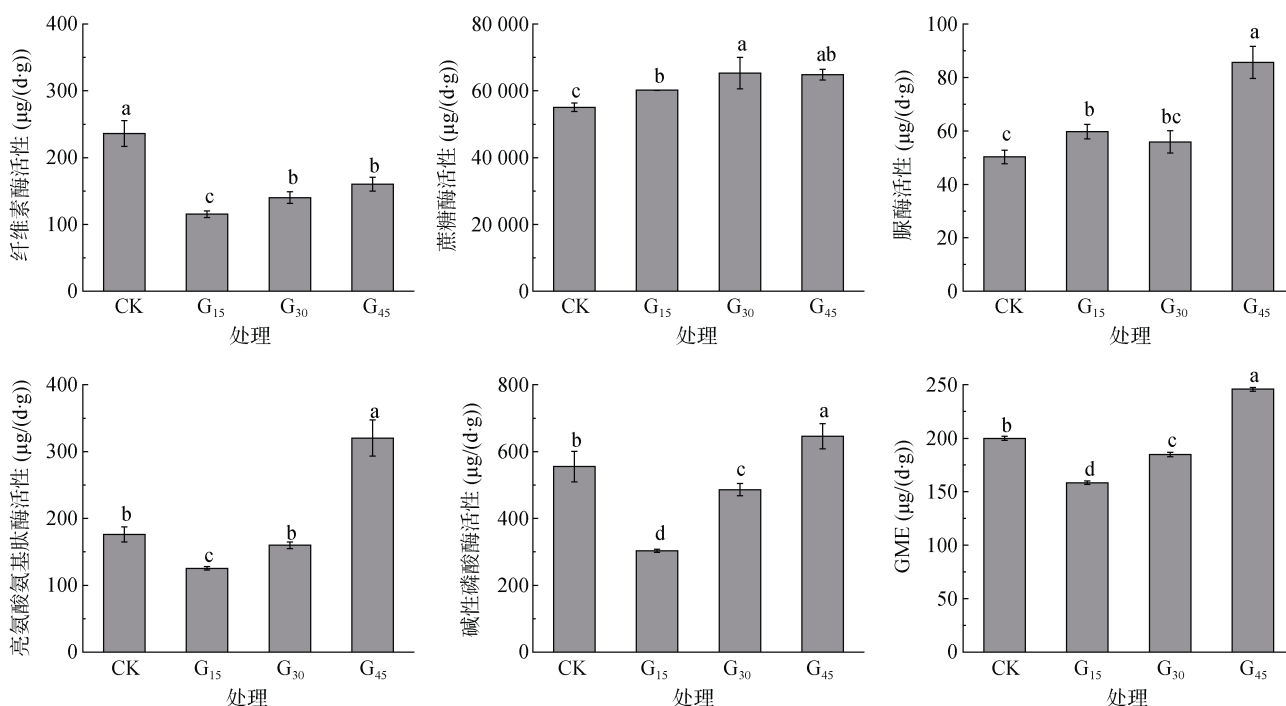
注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 土壤酶活性

添加磷石膏影响苏打盐碱稻田耕层碳、氮和磷循环相关酶活性(图 1)。其中,参与苏打盐碱稻田碳循环的蔗糖酶活性在 G_{30} 处理最高,较 CK 处理提高 18.57%,但与 G_{45} 处理之间无显著差异,说明添加 30 t/hm² 的磷石膏可增强蔗糖酶活性,而继续增加磷石膏添加量,蔗糖酶活性将不会显著增强。此外,也说明添加 30 t/hm² 的磷石膏有利于提高苏打盐碱稻田碳循环能力。纤维素酶活性在 CK 处理最高,为 236.10 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$,各磷石膏处理的纤维素酶活性均低于 CK 处理,说明添加磷石膏的土壤环境可能不利于增强纤维素酶活性。参与苏打盐碱稻田氮循环的脲酶

和亮氨酸氨基肽酶活性在 G_{45} 处理最高,分别较 CK 处理提高 70.25% 和 118.57%,并且与其他处理存在显著差异,说明增加磷石膏添加量有利于增强脲酶和亮氨酸氨基肽酶活性。参与苏打盐碱稻田磷循环的碱性磷酸酶活性在 G_{45} 处理最高,较 CK 处理提高 51.30%,并且与其他处理存在显著差异,说明增加磷石膏添加量有利于增强碱性磷酸酶活性。

土壤酶活性综合指数(GME)计算表明,CK 处理为 199.95 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$, G_{15} 处理为 158.38 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$, G_{30} 处理为 184.79 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$, G_{45} 处理为 245.86 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$, $G_{45}>\text{CK}>G_{30}>G_{15}$ (图 1)。因此,添加 45 t/hm² 磷石膏的苏打盐碱稻田耕层土壤综合酶活性最高。



(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))

图 1 磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤碳、氮和磷循环相关酶活性及酶活性综合指数变化

Fig. 1 Variations in soil enzyme activity related to C, N and P cyclings and the geometric mean of enzyme activities of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields under different phosphogypsum addition levels

2.3 驱动土壤酶活性的肥力因子

肥力指标与酶活性的 RDA 结果显示, RDA1 轴和 RDA2 轴分别可以解释总方差的 66.29% 和 23.77%, 合计解释度达 90.06%, 说明本研究所选土壤肥力指标可以很好地解释与酶活性的关系(图 2)。其中, TN、SOC、AP 和 TP 含量显著影响酶活性($P<0.05$, 表 2)。RDA 图中箭头和原点之间的距离表示土壤肥力指标与酶活性的相关程度, 连线越长, 相关性越高, 反之则越小, 即当 Pseudo- F 值越大时, 土壤肥力对酶活性的影响程度越高。因此, TN 和 SOC 含量对苏打盐碱稻田土壤酶活性影响最大, 其次是

AP 和 TP 含量(表 2)。

基于 RDA 结果, 筛选对土壤酶活性具有较大影响的 TN、SOC、AP 和 TP 进行 PLS 路径分析, 得到土壤肥力对酶活性的直接效应(图 3), 其中对与碳、氮、磷循环相关酶活性的拟合优度指数(GFI)分别为 0.827、0.871 和 0.839, 说明模型适配良好。PLS 模型表明, 磷石膏添加量对 TN、SOC、AP 和 TP 的影响体现为显著正效应, 路径系数分别为 0.82、0.80、0.81 和 0.81。TN 含量对纤维素酶和蔗糖酶活性的影响体现为显著正效应, 路径系数分别为 1.05 和 0.89; SOC 含量对纤维素酶活性的影响体现为显著正效应,

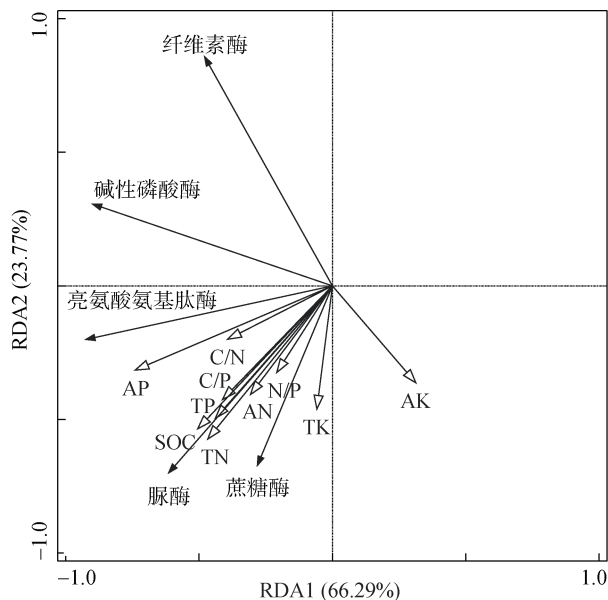


图 2 磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤肥力与酶活性的冗余分析

Fig. 2 RDA of soil fertility and enzyme activity of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields under different phosphogypsum addition levels

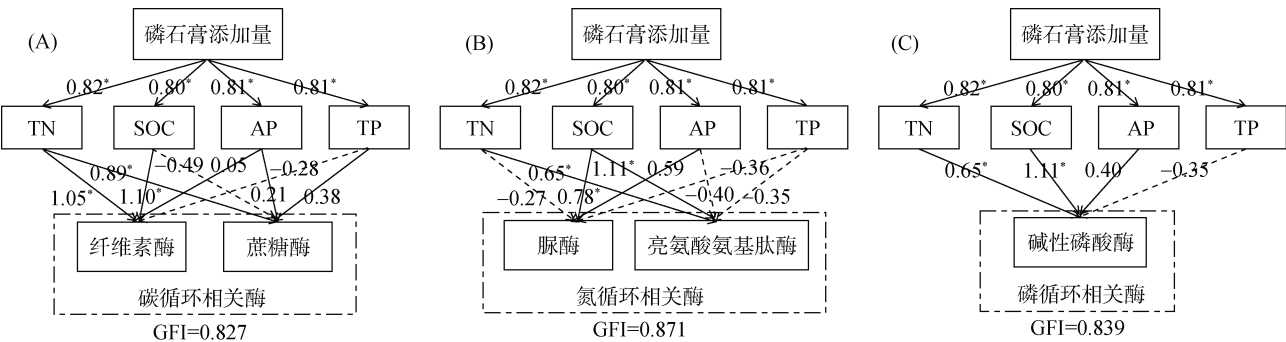
路径系数为 1.10(图 3A)。TN 含量对亮氨酸氨基肽酶活性的影响体现为显著正效应，路径系数为 0.65；SOC 含量对脲酶和亮氨酸氨基肽酶活性的影响体现

表 2 苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性相关的肥力指标贡献值排序

Table 2 Ranking of soil fertility indicator contribution values related to enzyme activity of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields

肥力指标	贡献值(%)	Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i>
TN	37.3	5.4	0.008
SOC	37.1	5.4	0.006
AP	33.5	4.6	0.004
TP	33.3	4.6	0.010
C/P	19.6	2.3	0.086
AN	13.9	1.5	0.210
C/N	13.1	1.4	0.252
TK	8.9	0.9	0.466
AK	8.1	0.8	0.456
N/P	7.5	0.8	0.532

为显著正效应，路径系数分别为 0.78 和 1.11(图 3B)。TN 和 SOC 含量对碱性磷酸酶活性的影响体现为显著正效应，路径系数分别为 0.65 和 1.11(图 3C)。以上结果说明，磷石膏不同添加量会通过改变 TN 和 SOC 含量间接影响纤维素酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性，通过改变 TN 含量间接影响蔗糖酶和脲酶活性。



(图中箭头旁边的数字表示路径系数，实线表示具有正向影响，虚线表示具有负向影响，*表示在 $P < 0.05$ 水平影响显著)

图 3 磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性变化路径分析

Fig. 3 Path analysis of variations in soil enzyme activity of the cultivated layer in saline-sodic paddy fields under different phosphogypsum addition levels

3 讨论

3.1 苏打盐碱稻田耕层土壤肥力对磷石膏添加的响应

土壤养分含量是反映土壤肥力水平的核心指标。本研究中，添加 45 t/hm² 磷石膏提高苏打盐碱稻田耕层 SOC、TN、TP 和 AP 含量，这表明添加磷石膏促进苏打盐碱稻田耕层养分释放，从而增强土壤肥力。这与卢维宏等^[18]的研究结果一致。添加磷石膏使苏打盐碱稻田耕层养分含量提高的原因主要是添加磷石膏不仅降低土壤盐碱程度，而且向土壤补充硫、钙、

硅、镁和钾等元素，使土壤性质得到改善，为微生物的生长繁殖营造新环境，从而激活微生物活性、提高微生物数量以及改善微生物群落结构，间接影响微生物参与的土壤碳、氮和磷等营养元素的循环过程，进而促进土壤养分的释放^[19]。例如，噬几丁质菌科可以降解木质素，分解多糖，有利于加快土壤有机质的降解，促进养分释放^[20]。

土壤碳、氮和磷化学计量比是反映土壤质量的重要指标，对作物生长发育至关重要^[21]。本研究中，添加 45 t/hm² 磷石膏影响土壤 C/N 和 C/P，但对土壤

N/P 无显著影响,这说明添加 45 t/hm² 磷石膏使土壤有机质分解速度加快、氮和磷的有效性以及磷的矿化速率提高,最终增强土壤肥力,这与陈小雪等^[21]的研究结果一致。各项生态化学计量比提高的原因可能是磷石膏改善盐碱土的恶劣性质后,土壤微生物活性提高且数量增加,从而提高土壤养分的转化速率,最终增加土壤碳和氮的积累量^[22]。土壤 AP 含量提高的原因是磷石膏中含有的磷元素增加土壤磷含量。另外,土壤微生物活性提高后,微生物对土壤有机磷矿化能力增强,进而会提高土壤有 AP 含量^[23]。此外,本研究发现各处理的 C/N 均低于全球平均值 1.41^[24],而 C/P 和 N/P 均高于全球平均值 0.62 和 0.44,表明该区域土壤碳供给相对充足,而氮转化酶活性较高,反映研究区域氮素缺乏,应注重土壤氮元素的补充。

3.2 苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性对磷石膏添加的响应

土壤酶是土壤中最活跃的部分,对土壤环境变化具有潜在敏感性,其活性反映土壤中所发生的生物化学反应和肥力变化。土壤酶参与土壤生态系统物质循环和能量流动,其活性也能够反映土壤养分循环能力的强弱^[25]。蔗糖酶参与土壤中碳水化合物转化^[26],纤维素酶分解由碳水化合物和酚类物质构成的土壤有机质和植物组织^[27],二者参与土壤碳循环过程。本研究发现,添加 30 t/hm² 磷石膏使蔗糖酶活性显著提高,说明土壤中碳水化合物的转化能力增强,土壤碳循环能力提高,与谢晓蓉等^[28]的研究结果“添加石膏能够提高草甸盐土的蔗糖酶活性”一致。添加磷石膏使纤维素酶活性下降,可能是因为磷石膏含有的磷和硫与土壤中的 H⁺ 发生反应,降低土壤 pH,影响纤维素酶活性。脲酶促进土壤中的有机氮向有效氮转化^[29],亮氨酸氨基肽酶水解亮氨酸和其他疏水氨基酸,其活性反映土壤氮素转化和供给状况^[29],二者参与土壤氮循环过程。本研究发现,添加 45 t/hm² 磷石膏使脲酶和亮氨酸氨基肽酶活性显著提高,说明土壤中有有机氮向有效氮转化的能力增强,土壤氮循环能力提高。这与王睿彤等^[30]的研究结果较为一致,其发现,添加石膏能够提高滨海盐碱地的脲酶活性,从而提高土壤氮素供应强度。碱性磷酸酶将土壤有机磷水解为供植物利用的无机磷^[31],参与土壤磷循环过程。本研究发现,添加 45 t/hm² 磷石膏使碱性磷酸酶活性显著提高,说明土壤有机磷水解为供植物利用的无机磷增多,土壤磷循环能力增强,这也与王睿彤等^[30]的研究结果一致。碱性磷酸酶活性提高的原因可能是施用石膏降低土壤 pH,有利于碱性磷酸酶活

性的增强。同时,本研究还发现,不同酶对石膏不同添加量的响应有所差异,这导致 CK 处理的 GME 高于 G₁₅ 和 G₃₀ 处理,原因之一可能是酶活性受土壤 pH 影响,不同的酶具有不同的最适 pH 范围,其次,酶活性与底物浓度有关,石膏添加可能改变底物的浓度,从而影响酶活性^[32]。

3.3 苏打盐碱稻田耕层肥力特征与酶活性间的关系

土壤肥力会对酶的生化特性和分泌产生影响,而土壤酶又直接或间接参与土壤肥力因子的有效转化过程。因此,土壤肥力与土壤酶活性相互联系,密切相关^[33]。其中,蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶等能够直接影响土壤碳、氮和磷生物化学循环过程的强度。本研究中, TN、SOC、AP 和 TP 含量对苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性影响最大,说明土壤肥力是影响苏打盐碱稻田耕层土壤酶活性的重要因素。SOC 含量影响酶活性的原因可能是蔗糖酶活性与 SOC 含量密切相关,土壤有机碳库对蔗糖酶活性的变化响应强烈,酶活性增强又可以提高有机碳库量^[34]。此外, SOC 是微生物最常利用的碳源之一,包括葡萄糖、果糖、淀粉等可供微生物直接利用的有机物。这些碳源能够为微生物提供丰富的能量和碳原子,满足其生长和代谢的需求。微生物通过分解有机物,将 SOC 转化为能量和细胞物质。例如,葡萄糖是一种最常见的有机碳源,微生物可以通过糖酵解途径,将葡萄糖分解为乳酸、酒精等产物,释放能量并维持其生命活动。微生物生长和活性的提高进而增加土壤酶活性。TN、TP 和 AP 可通过直接效应作用于土壤氮磷循环相关酶,是土壤中影响酶活性的重要因子,这是造成 TN、TP 和 AP 含量影响酶活性的重要原因。土壤肥力与酶活性之间相互影响,有研究发现土壤有机质和速效养分含量的提高有助于增强脲酶和蔗糖酶等的活性,酶活性的增强又加速有机质的分解和其他有效养分的转化^[35]。

3.4 添加磷石膏可能引发的土壤质量问题以及未来研究方向的建议

添加磷石膏改良苏打盐碱土虽可提高土壤肥力和酶活性,但也可能带来土壤环境安全问题。磷石膏中含有硫、铁和铝等元素以及砷、汞和镉等重金属^[36]。添加磷石膏改良盐碱土会向土壤中引入上述元素,从而对土壤生态系统带来其他影响。一方面表现为某种特定元素含量大幅增加,破坏土壤生态系统平衡,从而对土壤理化性质、微生物活性和作物生长产生不利影响;另一方面表现为引入元素在新环境中发生的形态变化及其不确定的影响。例如, SO₄²⁻ 能

够被植物吸收利用,但在厌氧环境下也能够转化为 H_2S ,危害作物生长发育。因此,添加磷石膏也可能对土壤和环境安全造成危害。未来研究中应注意磷石膏添加量的把控,并注重深入探究被动引入元素发生的生物地球化学过程,以及施用磷石膏带来的生态环境风险。

4 结论

添加磷石膏不但提高苏打盐碱稻田耕层土壤肥力,而且增强碳、氮和磷循环相关土壤酶活性。在磷石膏不同添加量下苏打盐碱稻田耕层土壤肥力和酶活性存在差异。添加 45 t/hm^2 磷石膏处理SOC、TN、TP、AP、C/N和C/P提高幅度最大,较CK处理分别提高42.86%、33.25%、26.41%、115.47%、7.55%和10.78%。不同种类土壤酶的活性在各处理间差异明显,添加 45 t/hm^2 磷石膏处理土壤脲酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性最高,添加 30 t/hm^2 磷石膏处理土壤蔗糖酶活性最高,而添加磷石膏未提高纤维素酶活性。影响酶活性的主要因素是TN、SOC、AP和TP含量。磷石膏不同添加量会通过改变TN和SOC含量间接影响纤维素酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性,改变TN含量间接影响蔗糖酶和脲酶活性。未来利用磷石膏改良盐碱土应注意把控磷石膏的适宜添加量,避免引发土壤生态系统失衡和重金属污染。

参考文献:

- [1] Zhao W, Zhou Q, Tian Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 722: 137428.
- [2] Jiang C J, Liang Z W, Xie X Z. Priming for saline-alkaline tolerance in rice: Current knowledge and future challenges[J]. *Rice Science*, 2023, 30(5): 417–425.
- [3] Basak N, Rai A K, Sundap P, et al. Soil management for salt-affected soil[M]. New York: Academic Press, 2023: 99–128.
- [4] Huang L H, Liu Y, Ferreira J F S, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105222.
- [5] 黄艳飞, 陈君梅, 辛亚宁, 等. 石膏对苏打盐碱土壤理化性质的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(11): 139–146.
- [6] 回嵘, 谭会娟, 黄磊, 等. 柴达木盆地盐渍化土壤养分和酶活性特征[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(11): 1776–1784.
- [7] 王思霖, 国艳春, 曾路生, 等. 碱蓬播种量对滨海盐碱地土壤酶活性和团聚性的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(12): 179–185.
- [8] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 757–762.
- [9] 李婧男, 孙向阳, 李素艳. 有机无机改良剂对滨海盐渍化土壤酶活性和土壤微生物量的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 160–165.
- [10] 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.
- [11] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 277–280.
- [12] 陈孔飞, 张仁陟, 蔡立群, 等. 盐渍化对沙枣林土壤养分和酶活性的影响[J]. *国土与自然资源研究*, 2020(5): 60–64.
- [13] 王响玲, 夏浩, 李宇轩, 等. 施用生物炭对2种典型土壤养分有效性及肥力特征的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5): 158–167.
- [14] 王翊婷, 陈强, 马良, 等. 深埋秸秆及淋洗处理对盐碱土壤改良效果研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(12): 159–166.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] Hinojosa M B, García-Ruiz R, Viñegla B, et al. Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcóllar toxic spill[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10): 1637–1644.
- [18] 卢维宏, 王要芳, 刘娟, 等. 磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 699–707.
- [19] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1124–1131.
- [20] 李慧君, 张伟健, 吴伟健, 等. 种植海水稻对滨海盐土化学性质和微生物群落影响[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(9): 147–156.
- [21] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地土壤化学计量特征与群落物种多样性及其相关关系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 37–45, 59.
- [22] 张睿媛, 袁丹, 秦树平, 等. 碳氮磷化学计量比对土壤有机碳矿化激发效应的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1311–1321.
- [23] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(6): 945–952.
- [24] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecosystem stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795–798.
- [25] 邓健, 赵雪, 卢笑玥, 等. 半干旱草地土壤团聚体氮磷

- 转化相关酶活性对氮添加的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6539–6549.
- [26] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 824–833.
- [27] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171–178.
- [28] 谢晓蓉, 刘金荣, 王引权, 等. 功能性盐土改良肥对河西走廊草甸盐土的改土效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 67–74.
- [29] 闵凯凯, 何向阳, 吴倩怡, 等. 参与碳氮磷转化的水解酶对不同施肥响应的差异[J]. 土壤, 2020, 52(4): 718–727.
- [30] 王睿彤, 孙景宽, 陆兆华. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 425–431.
- [31] 解梦怡, 冯秀秀, 马寰菲, 等. 秦岭锐齿栎林土壤酶活性与化学计量比变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2020, 44(8): 885–894.
- [32] 袁佳宝, 宋艳宇, 刘桢迪, 等. 松嫩平原芦苇湿地土壤酶活性剖面分布特征及其微生物养分限制指示作用[J]. 生态环境学报, 2023, 32(12): 2141–2153.
- [33] 杨继芬, 李永梅, 李春培, 等. 不同种植模式对坡耕地红壤团聚体中酶活性及养分含量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 787–794.
- [34] 赵仁竹, 汤洁, 梁爽, 等. 吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 244–249.
- [35] 王巍巍, 魏春雁, 张之鑫, 等. 不同种稻年限盐碱地水田表层土壤酶活性变化及其与土壤养分关系[J]. 东北农业科学, 2016, 41(4): 43–48.
- [36] Dubrovina T A, Losev A A, Karpukhin M M, et al. Gypsum soil amendment in metal-polluted soils—an added environmental hazard[J]. Chemosphere, 2021, 281: 130889.