

孔涛,高一楠,付钟仪,等.维生素C发酵副产物对辽西土壤总养分的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4): 411-418.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250078

KONG Tao,GAO Yinan,FU Zhongyi,et al.Effects of vitamin C fermentation by-products on total soil nutrients in western Liaoning Province[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(4): 411-418. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250078

维生素C发酵副产物对辽西土壤总养分的影响

孔涛,高一楠,付钟仪,鲍斯诺,金鑫

(辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:为探究维生素C副产物古龙酸母液(RAE)和巨大芽孢杆菌菌渣(CBS)混施对辽西半干旱区土壤养分含量和化学计量比的影响,利用RAE和CBS混合液作为液体肥,开展5组田间试验,分别为:对照组(CK组)、低剂量单施(LR组)、高剂量单施(HR组)、低剂量混施(LRB组)和高剂量混施(HRB组)。研究表明:所有单施组的土壤有机碳(SOC)质量比显著高于CK组。混施组显著提高了土壤中氮的含量。随着RAE和CBS的添加,土壤中的氮有效性降低。与CK组相比,单施组和混施组均提高了土壤碳磷比,混施组氮磷比的平均值有所降低。混施组中,土壤碳氮比、碳磷比均提高,氮磷比降低,表现为氮、磷双限制,根周土更容易受到氮限制,根际土更容易受到磷限制。建议在使用RAE和CBS时,适当添加氮肥和磷肥,以解除氮、磷限制。

关键词:维C发酵副产物;古龙酸母液;巨大芽孢杆菌菌渣;土壤养分;化学计量比;半干旱区

中图分类号: S157; X787

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0411-08

Effects of vitamin C fermentation by-products on total soil nutrients in western Liaoning Province

KONG Tao, GAO Yinan, FU Zhongyi, BAO Sinuo, JIN Xin

(College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to explore the effects of mixed application of vitamin C by-product RAE and CBS on soil nutrient content and stoichiometric ratio in semi-arid area of western Liaoning Province, the mixed solution of RAE and CBS was used as liquid fertilizer to carry out five groups of field experiments: control group (CK group), low-dose single application (LR group), high-dose single application (HR group), low-dose mixed application (LRB group) and high-dose mixed application (HRB group). The results show that the soil organic carbon (SOC) mass ratio of all single application groups is significantly higher than that of CK group. The mixed application group significantly increases the nitrogen content in the soil. With the addition of RAE and CBS, the nitrogen availability in soil decreases. Compared with the CK group, the single application group and the mixed application group increase the soil carbon-phosphorus ratio, and the average nitrogen-phosphorus ratio of the mixed application group decrease. In the mixed application group, the soil C/N ratio and C/P ratio increased, and the N/P ratio decreases, which is characterized by double limitation of nitrogen and phosphorus. The rhizosphere soil is more susceptible to nitrogen limitation, and the rhizosphere soil is more susceptible to phosphorus limitation. It is recommended that nitrogen and phosphorus fertilizers should be appropriately added when applying RAE and CBS to remove nitrogen and phosphorus restrictions.

Keywords: vitamin C fermentation by-products; gulonic acid mother liquor; bacillus megaterium residue; soil nutrients; stoichiometric ratio; semi-arid area

收稿日期: 2025-03-06 修回日期: 2025-04-13 接受日期: 2025-04-18 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1501200); 鄂尔多斯市科技突围“揭榜挂帅”重大项目(JBGS2024010)

作者简介: 孔涛(1981-),男,陕西渭南人,博士,副教授,主要从事废弃资源循环利用和土壤改良方面的研究。E-mail: kongtao2005@126.com

0 引言

辽西半干旱区年降水量仅为450~550 mm, 风蚀强烈, 水土流失严重, 土壤养分贫瘠, 土地退化严重, 生态环境脆弱^[1]。该地区脆弱的生态环境和土地退化成为制约当地农业经济发展的关键因素。液体肥滴灌结合免耕秸秆覆盖技术, 能有效减少地表径流和土壤板结, 增强土壤水肥分布均匀性, 同时减少土壤水分蒸发, 缓解雨水对地表的冲刷, 能够保温促根, 改善土壤健康状况, 解决该地区干旱和土壤养分贫瘠问题^[2]。常规滴灌肥多为化肥, 易引起土壤板结, 且价格较高, 因此需要开发滴灌液体有机肥。古龙酸母液是一种成本较低且有较大增产作用的液体有机肥, 可以进行滴灌试验。

古龙酸母液(RAE)和巨大芽孢杆菌(CBS)是维生素C发酵过程中产生的两种副产物。RAE是一种深棕色黏性废液, 主要成分包括2-酮基-L-古龙酸(2KGA)、草酸、甲酸、乙酸等一系列小分子有机酸^[3-4]。研究表明, 由于RAE具有较低的酸性和富含小分子碳源的特性, 可作为盐碱土改良剂, 有效降低土壤pH值^[5], 增加有机碳和有效磷含量^[6]。此外, RAE在新疆旱区牧草地^[7]、矿山废弃地^[8]也得到了应用, 效果良好。CBS中含有巨大芽孢杆菌残体。研究发现, 将RAE与CBS混合使用可以显著提高作物产量, 同时对土壤肥力和细菌群落产生协同影响^[9], 这为提高农作物产量、改善土壤环境提供了新途径。

土壤养分主要由碳(C)、氮(N)和磷(P)组成。土壤C:N:P化学计量特征常被用于探索C、N和P元素之间的平衡和相互作用及生态系统养分循环, 同时也是反应土壤养分限制状况的重要指标^[10]。其中, 土壤碳氮比(C:N)影响土壤中C和N的循环, 还可以反映土壤中C和N养分矿化和固持能力是否平衡。土壤碳磷比(C:P)可以衡量土壤固磷潜力, 是预测养分限制的主要指标^[11-12]。开展土壤C:N:P化学计量特征研究对于农田土壤提升肥力、增加固碳、判断养分限制性元素等具有重要意义。

为探究RAE和CBS混用对辽西半干旱区土壤养分含量和化学计量比的影响, 使用RAE和CBS混合液作为液体肥, 通过滴灌技术进行施肥, 试验田采用免耕秸秆覆盖, 通过对土壤养分含量分析, 评估液体肥在辽西半干旱区的应用潜力, 为RAE和

CBS在辽西半干旱区土壤改良和利用奠定基础。

1 材料与方法

(1) 试验区概况

本研究的田间试验地点位于辽宁省阜新市阜新县马蹄营子镇。该区位于辽宁省西部(41°41'~42°56'N, 121°01'~122°56'E), 地处辽宁西北部内蒙古高原和辽河平原的过渡带^[13], 地势西高东低, 平均海拔为238 m, 属北温带半干旱季风大陆性气候, 年均气温为7.6℃, 年均降水量为493.5 mm。年内日照时数分配不均, 夏季日照时数较多, 占68.5%, 春秋季节干旱严重, 年均蒸发量为1 847.6 mm。土壤类型为褐土, 质地为砂壤土^[14]。

(2) 试验设计

RAE和CBS均来自东北制药有限责任公司。在玉米种植前利用粉碎机将上一茬玉米秸秆粉碎后(长度小于10 cm)平铺于地表。

采用免耕播种机播种, 基于玉米的不同生长期, 以浅埋滴灌追氮为对照, RAE和氮肥、RAE和CBS混合, 选取施肥后1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、21 d和30 d的土样, 并对土壤质量和玉米产量进行分析测量。RAE与CBS按1:2的质量比施用, 设置5种试验方式, 分别为CK(对照组)、LR组(低剂量RAE)、HR组(高剂量RAE)、LRB组(低剂量RAE+CBS)、HRB组(高剂量RAE+CBS), 每组重复4次, 共20个试验小区, 每小区面积50 m²(10 m×5 m, 含5垄)。

表1 田间试验小区施肥情况

Tab.1 fertilization situation in field experimental plots

试验组别	RAE+CBS剂量/(kg·hm ⁻²)	作物各滴管水肥比			追氮剂量/(kg·hm ⁻²)	重复次数
		拔节期	抽雄期	灌浆期		
CK	无	1/2	1/4	1/4	150	4
LR	75	1/2	1/4	1/4	150	4
HR	150	1/2	1/4	1/4	150	4
LRB	75+150	1/2	1/4	1/4	0	4
HRB	150+300	1/2	1/4	1/4	0	4

注:LR组和HR组总称为R组;LRB组和HRB组总称为RB组,下同。

(3) 土壤采样和指标测定方法

选取7个施肥后时间段的土样。根周土取样在根系周围3 cm范围内选点, 挖取0~15 cm深的土壤样品, 随后将各点取出的土壤混合均匀, 去除石块、根系等杂物, 装入样品袋中。根际土取样则先挖出完整的植物根系, 去除掉根系上多余石块, 用

刷子轻扫根系周围紧密附着的土壤,装入样品袋。两种土样均按指标检测要求风干和冷冻保存。

参照文献[15]方法,对采集的土样测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)。试验采用油浴加热消煮-重铬酸钾法测定SOC,采用凯氏定氮法测定TN,采用酸溶钼锑抗混合比色法测定TP。

利用SPSS 22.0软件计算试验数据的平均值和标准差,并进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 维生素C发酵副产物施肥对土壤总养分的影响

(1) 对SOC质量比的影响

维生素C发酵副产物施肥对不同时期土壤有机

碳(SOC)含量的影响见图1、图2。由图1可以看出,随施肥后时间延长,各试验组根周土的SOC质量比变化规律不同。CK组中,SOC的质量比在施肥后7 d内持续降低,28 d、30 d与7 d时基本一致。施加RAE的R试验组的土壤SOC质量比总体呈现先降低后上升的趋势,7 d时最低,30 d末期恢复至初期水平。LRB组中,SOC质量比先降后升,末期保持稳定,7 d时最低。HRB组中,SOC质量比先升后平稳再降低。由图2可见,对于根际土而言,CK组和RAE组中,SOC质量比均呈现持续降低的趋势,30 d时最低。LRB组中,SOC质量比先升后降,随后保持稳定。HRB组中,SOC质量比先持续上升,到30 d时出现大幅降低。

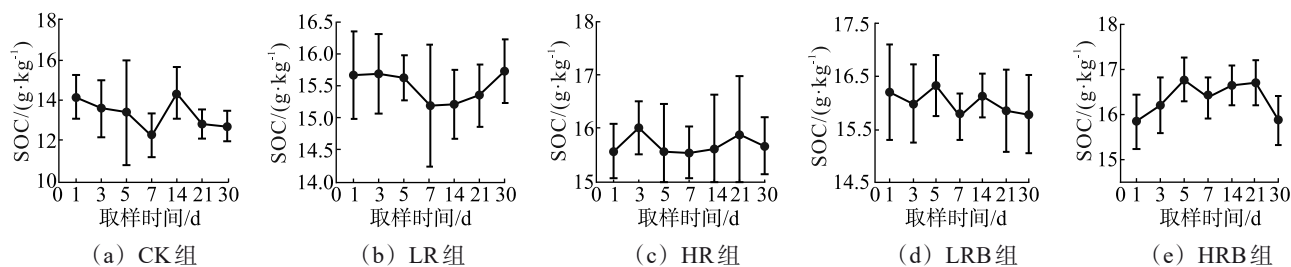


图1 维生素C发酵副产物施肥对根周土SOC的影响

Fig.1 effects of vitamin C fermentation by-products on SOC content in root soil

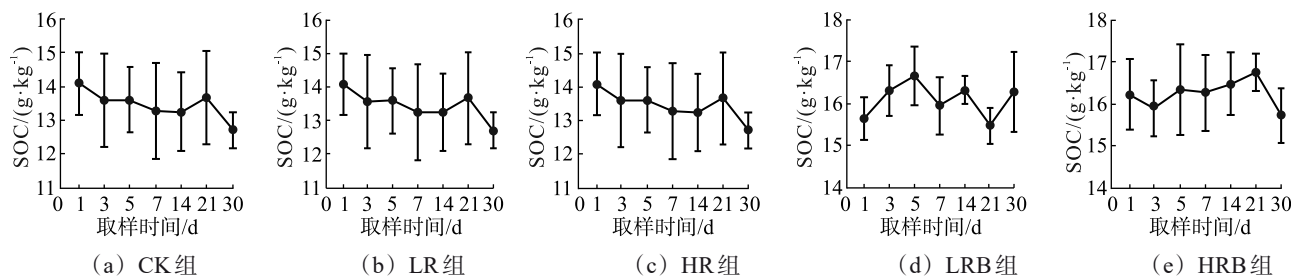


图2 维生素C发酵副产物施肥对根际土SOC的影响

Fig.2 effects of vitamin C fermentation by-products on SOC content in rhizosphere soil

总体来看,30 d时,CK组中,根周土和根际土的SOC质量比均低于初始值。单施和混施肥料后30 d,根周土的SOC质量比有一定程度提升,表明RAE和CBS单施和混施均对根周土的固碳能力有一定影响。土壤SOC含量总体在7~14 d时最低,因此建议在该时期补充RAE等碳肥。

各试验组不同时期的SOC质量比平均值见图3。图3中,A/B表示根周/根际土在不同施肥处理间存在显著差异($P<0.05$),a/b表示相同施肥处理下根周与根际土壤间存在显著差异($P<0.05$),下文同。由图3可见,R组和RB组的根周土和根际土SOC质量比均显著高于CK组,而R组和RB组之间无显著差异。与CK组相比,R组、RB组根周土的SOC质量比分别提高了16.31%、17.81%、20.1%、22.67%,根际土的SOC质量比分别提高了

12.74%、17.47%、19.61%、20.77%。

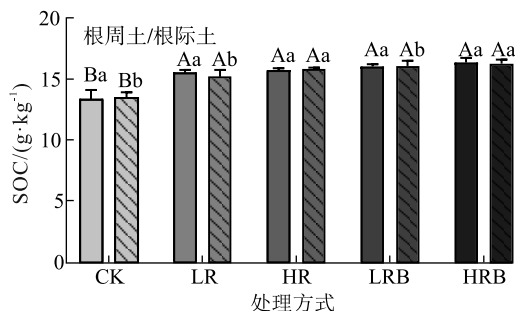


图3 维生素C发酵副产物施肥对土壤SOC的影响

Fig.3 effects of vitamin C fermentation by-product fertilization on soil SOC

(2) 对土壤TN质量比的影响

维生素C发酵副产物施肥对土壤TN质量比的影响见图4、图5。由图4可见,施肥后CK组中,

根周土的 TN 质量比先升后降, 随后保持稳定, 在 3 d 时至最高点, 7 d 时至最低点。R 组中, TN 质量比在试验前期下降平稳, 而末期下降较快, 随后保持稳定。RB 组中, TN 质量比先持续下降, 末期上升, 1 d 时 TN 质量比最高, 21 d 时最低。由图 5 可见, 根际土 CK 组和 R 组变化规律一致, 均先

升后降, 随后保持稳定。CK 组中, 3 d 时 TN 质量比最高, 7 d 时 TN 质量比最低。LR 组中, 3 d 时 TN 质量比最高, HR 组中, 7 d 时 TN 质量比最高。RB 组中, TN 质量比先上升后下降再上升。LRB 组中, 3 d 时 TN 质量比最高, HRB 组中, 5 d 时 TN 质量比最高。

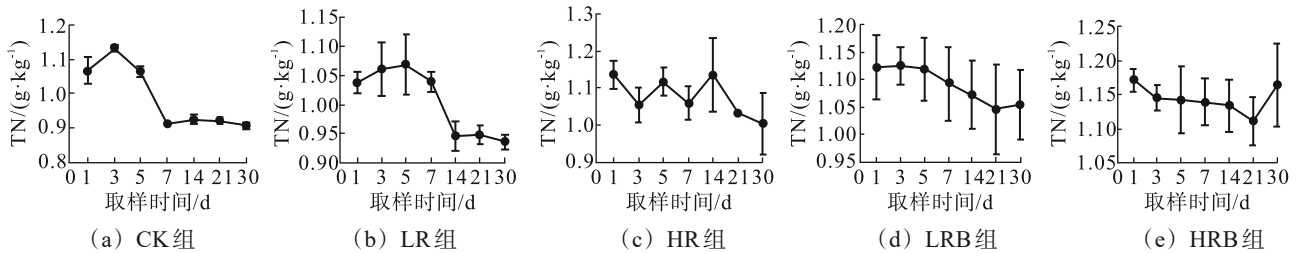


图 4 维生素 C 发酵副产物施肥对根周土 TN 的影响

Fig.4 Effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on TN in root soil

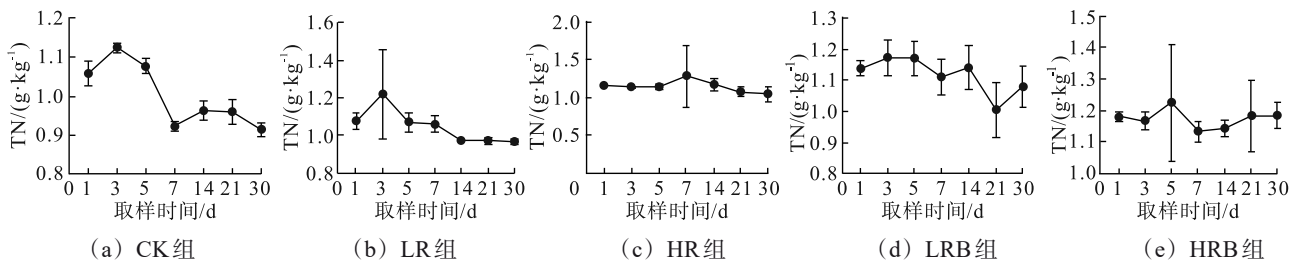


图 5 维生素 C 发酵副产物施肥对根际土 TN 的影响

Fig.5 effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on TN in rhizosphere soil

总体来看, CK 组中, 30 d 时, 根周土和根际土的 TN 质量比低于初始值。单施肥料试验组中, 相比于初始值, 30 d 时的 TN 质量比大幅降低。高剂量混施试验中, 30 d 时的 TN 质量比接近于初始值, 表明高剂量混施能够补偿玉米生长的氮消耗, 具有平衡土壤和植物间氮素量效果。土壤 TN 质量比在 14~21 d 时最低, 因此建议在该时期补充尿素等氮肥。

各试验组不同时期的 TN 质量比平均值见图 6。

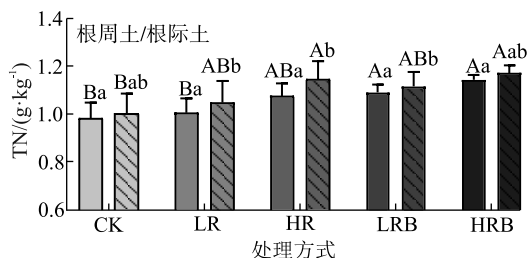


图 6 维生素 C 发酵副产物施肥对土壤 TN 的影响

Fig.6 effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on soil TN

由图 6 可以看出, 与 CK 组相比, LR 组根周土和根际土的 TN 质量比平均值略高, HR 组、RB 组根周土和根际土的 TN 质量比平均值较高。与

CK 组相比, R 组、RB 组根周土的 TN 质量比分别提高了 2.5%、9.8%、11.17%、16.69%, 根际土的 TN 质量比分别提高了 4.6%、14.4%、11.3%、16.9%。显著性比较显示, R 组和 RB 组的根周土和根际土 TN 质量比无显著差异, RB 组和 CK 组的根周土 TN 质量比存在显著差异。

(3) 对土壤 TP 质量比的影响

维生素 C 发酵副产物施肥对根周土和根际土的影响见图 7、图 8。由图 7、图 8 以看出, 对于根周土而言, 施肥后 CK 组、LR 组和 RB 组的土壤 TP 质量比的趋势变化一致, 均呈现先升后降后保持平稳, HR 组的土壤 TP 质量比先升后降, 随后明显上升。CK 组的 TP 质量比在 3 d 时最高, LR 组的 TP 质量比在 5 d 时最高, HR 组的 TP 质量比在 30 d 时最高, RB 组的 TP 质量比均在 7 d 时最高。对于根际土而言, 施肥后 CK 组的 TP 质量比变化趋势不明显, 相对平稳。R 组和 RB 组的 TP 质量比趋势变化一致, 均呈现先升后降, 然后再上升的趋势。R 组中, 均在 5 d 时 TP 质量比最高, 14 d 时 TP 质量比最低; RB 组中, TP 质量比在 21 d 时最低。

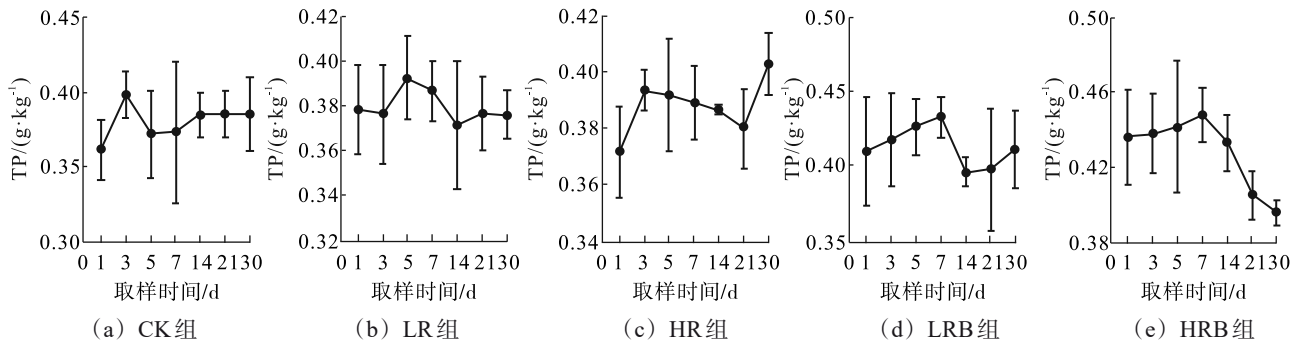


图7 维生素C发酵副产物施肥对根周土TP的影响

Fig 7 Effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on TP in root soil

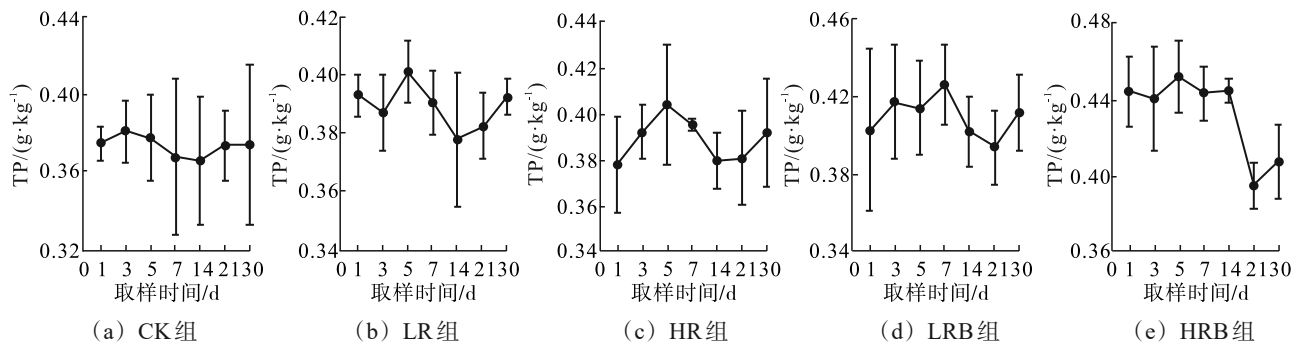


图8 维生素C发酵副产物施肥对根际土TP的影响

Fig 8 Effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on TP in rhizosphere soil

总体来看,CK组中,30 d时,根周土和根际土的TP质量比与初始值基本持平。单施处理和低剂量混施处理的试验组中,30 d时,TP质量比均与初始值基本一致。仅有高剂量混施的试验组在30 d时的TP质量比与初始值相比有明显下降,表明高剂量混施能有效转化土壤中难溶性磷为可吸收利用的磷元素,具有良好的解磷效果。土壤TP质量比总体在21~30 d时最低,建议在该时期补充具有解磷效果的RAE和CBS混施肥。

各试验组不同时期的TP质量比平均值见图9。

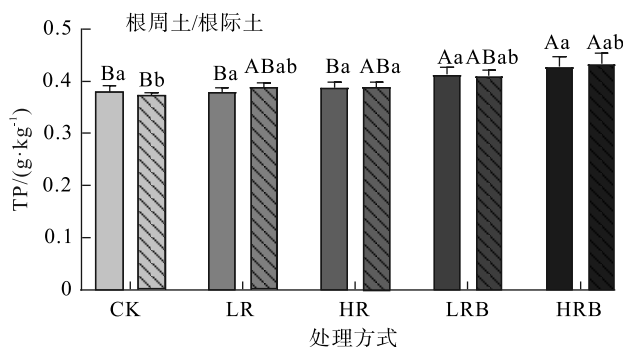


图9 维生素C发酵副产物施肥土壤TP的影响

Fig.9 effect of vitamin C fermentation by-products fertilization on soil TP

由图9可以看出,与CK组相比,R组根周土和根际土的TP质量比平均值略高,RB组根周土和根际土的TP质量比平均值较高。与CK组相比,R组、RB组的根周土TP质量比的平均值分别提高了0.2%、2.1%、8.8%、12.66%,根际土TP质量比的平均值分别提高了4.19%、4.14%、9.71%、15.85%。显著性比较可见,R组和CK组的根周土和根际土的TP质量比无显著差异。对于根周土的TP质量比而言,RB组与R组和CK组存在显著差异,对于根际土的TP质量比而言,HRB组与CK组存在显著差异。

2.2 维生素C发酵副产物施肥对土壤化学计量比的影响

(1) 对土壤碳氮比的影响

不同试验组维生素C发酵副产物施肥对土壤碳氮比的影响见图10。由图10可以看出,与CK组相比,各试验组根周土和根际土碳氮比的均值均有所提高,HRB组显著提高,根周土提高了19.1%,根际土提高了16.48%。将根周土与根际土的碳氮比进行比较可见,各试验组中,根周土的碳氮比均显著高于根际土的碳氮比,分别提高了21.45%(CK组)、20.47%(LR组)、22.71%(HR组)、21.7%(LRB组)、24.23%(HRB组)。

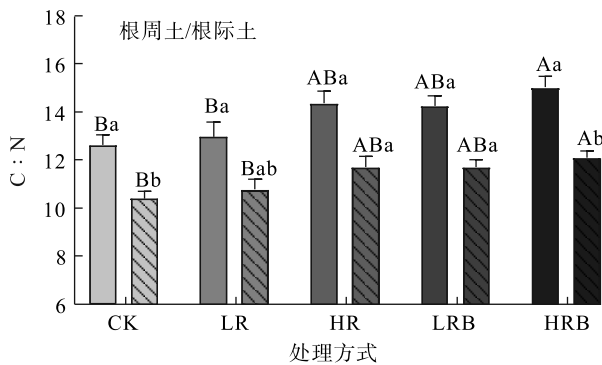


图 10 维生素 C 发酵副产物施肥对土壤碳氮比的影响

Fig.10 effects of vitamin C fermentation by-product fertilization on soil Carbon-nitrogen ratio

(2) 对土壤碳磷比的影响

不同试验组维生素 C 发酵副产物施肥对土壤碳磷比的影响见图 11。由图 11 可以看出, 与 CK 组相比, 各试验组根周土和根际土碳磷比的均值均有所提高, 其中 HRB 组根周土和根际土碳磷比显著提高, 根周土提高 9.67%, 根际土提高 13.42%。比较根周土与根际土碳磷比可知, RB 组、CK 组和 HR 组中, 根际土碳磷比显著高于根周土, 分别提高 1.8% (LRB 组)、4.4% (HRB 组)、0.97% (CK 组)、1.7% (HR 组)。

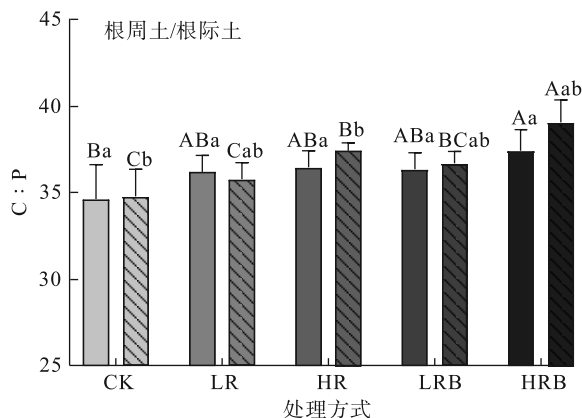


图 11 维生素 C 发酵副产物施肥对土壤碳磷比的影响

Fig.11 Effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on soil carbon-phosphorus ratio

(3) 对土壤氮磷比的影响

不同试验组维生素 C 发酵副产物施肥对土壤氮磷比的影响见图 12。由图 12 可以看出, 与 CK 组相比, R 组和 HRB 组根周土和根际土的碳磷比均有所下降。与 CK 组相比, HRB 组、LR 组的根际土和 HR 组的根周土、根际土土壤碳磷比显著降低, 分别降低 15% (HRB 根际土)、15.1% (LR 根际土)、13.7% (HR 根际土)、3.77% (HR 根周土)。

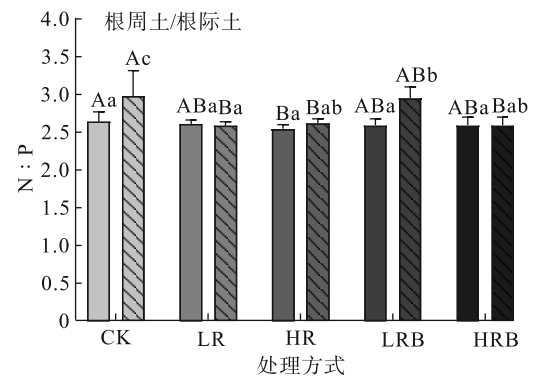


图 12 维生素 C 发酵副产物施肥对土壤氮磷比的影响

Fig.12 Effect of vitamin C fermentation by-product fertilization on soil nitrogen and phosphorus ratio

3 讨论

土壤 C、N、P 是土壤养分的重要组成部分, 是植物生长的基础, 对植物的发育、分布、演替起重要作用^[16]。研究表明, 所有施加古龙酸母液 (RAE) 的玉米地土壤 SOC 质量比显著高于 CK。原因有两方面: 一方面 RAE 中含有丰富的小分子碳 (低分子量有机酸)^[17]; 另一方面, RAE 中低分子量有机酸能够激发土壤微生物增殖, 土壤微生物死后残体中也能增加土壤 SOC^[18-19]。相比于单施 RAE 组 (R 组), RB 组对土壤 SOC 质量比并无提高作用, 原因在于 RB 组中巨大芽孢杆菌菌渣 (CBS) 主要成分为蛋白渣, C 质量比很少, 对 SOC 质量比提升有限。CBS 中丰富的蛋白渣也导致 RB 试验组土壤 N 质量比的显著提高^[20-21]。由于 RAE 中含有少量 N (4.6 g/L)^[22], 因此, LR 组对土壤 TN 质量比提高尚不明显, 但 HR 组能显著提高 TN 质量比。同时, 由于 RAE 试验组中 P 质量比极少, 因此对 R 试验组中土壤总 P 含量提高没有作用。将 RAE 应用于排土场土壤^[23], 显著提高了 SOC 等养分的质量比, 这与本研究结果是一致的。

从根际土和根周土的比较分析可见, 根际土的 N、P 质量比的均值高于根周土^[24], 原因在于玉米根系在进行生理活动时会不断地向外界分泌有机质, 而这些分泌物分解会增加根际土壤养分含量, 此外根际土壤微生物多样性及生理活动较根周土相比更活跃, 加速了 N 和 P 的归还^[25]。学者们比较了华北落叶松^[26]沙棘^[27]紫花苜蓿^[28]的根际土与根周土土壤养分, 根际土土壤养分普遍高于根周土, 支撑了本研究结论。随着施肥时间的延长, 土壤 C、N、P 质量比在 30 d 时总体最低, 土壤 TN 降幅最大, 达到 6.16%, 原因在于取样时间位于抽雄期, 对养分需求较大, 尤其对氮需求最大。

本研究各试验组的土壤碳氮比均高于全球陆地土壤和中国陆地土壤碳氮比的平均值^[29] (分别为12.25和12.34),表明与全国土壤相比,本研究区土壤相对受到氮限制。各施肥处理的碳氮比均高于CK处理,说明随着RAE和CBS的添加,土壤氮的有效性降低。土壤有机质分解的最适合碳氮比为25^[30],本研究中,碳氮比均低于25,说明有机质分解受到限制。

各试验组的土壤碳磷比均远低于全球陆地土壤和中国陆地土壤的碳磷比平均值 (分别为72.07和52.7),表明磷含量相对丰富。与CK处理相比,RAE和CBS均提高了土壤的碳磷比,土壤磷含量相对较低。与全球陆地土壤和中国陆地土壤氮磷比的平均值相比,当氮磷比小于10时,作物生产力会受到氮的限制^[31],与CK组相比,RB组的氮磷比平均值有所降低,表明本区域土壤在施入RAE和CBS后依然受到氮的限制。

综上,施加RAE和CBS后,受到氮、磷限制较为严重,建议后续施肥中加大CBS用量,同时适当添加磷肥。从根际土和根周土的差异来看,根际土碳氮比均低于根周土,而碳磷比和氮磷比总体高于根周土,表明根周土更易受氮限制,根际土更易受到磷限制。

4 结论

(1) 在辽西半干旱区通过滴灌措施施加古龙酸母液(RAE)和巨大芽孢杆菌菌渣(CBS)后,各剂量下土壤SOC质量比均显著提高。LR组和RB组中,TN质量比总体显著提高,RB组还显著提高了TP质量比。

(2) 根周土和根际土的土壤SOC质量比无差异,根际土的TN和TP质量比总体高于根周土。与CK组相比,RB组均提高了土壤碳氮比、碳磷比,降低了氮磷比,表现为氮、磷双限制。根际土碳氮比均低于根周土,根际土碳磷比和氮磷比总体高于根周土,表明根周土更容易受到氮限制,根际土更容易受到磷限制。建议在施用RAE和CBS时,适当添加氮肥和磷肥,以解除氮、磷限制。

(3) RAE和CBS联合施用,加大CBS的用量,再适当添加磷肥可以作为辽西半干旱区玉米种植的有效施肥措施。

参考文献(References):

- [1] 周晏平. 辽宁省阜新市水土流失变化特征及防治对策[J]. 中国水土保持,2024(12):90-92.
ZHOU Yanping. Change characteristics and prevention and control

- measures of soil erosion and water loss in Fuxin City of Liaoning Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(12):90-92.
- [2] 盛明,李佳垚,雷琬莹,等. 耕作方式与秸秆还田量对黑土有机碳组分和肥力指数的影响[J]. 土壤与作物,2025,14(1):53-63.
SHENG Ming, LI Jiayao, LEI Wanying, et al. Characteristics of active carbon fractions and fertility index of black soil under different soil tillage and straw returning amount[J]. Soils and Crops, 2025, 14(1): 53-63.
- [3] 徐慧,张颖,李慧,等. 利用古龙酸母液生产的抗生土壤改良剂及其制备方法:200610134528.3[P]. 2008-12-10.
- [4] 徐慧,杨伟超,李嘉文. 维生素C第二步混菌发酵技术研究新进展[J]. 微生物学杂志,2021, 41(2):1-9.
XU Hui, YANG Weichao, LI Jiawen. New progress on the second step of the mixed fermentation for vitamin C[J]. Journal of Microbiology, 2021, 41(2):1-9.
- [5] 刘翔毓,王丽群,王鸿斌,等. 硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成及复合体的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(5):387-392.
LIU Xiangyu, WANG Liqun, WANG Hongbin, et al. Effects of aluminum sulfate and organic materials on organic carbon composition and complex in saline-alkali soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 387-392.
- [6] KONG T, XU H, WANG Z Y, et al. Effect of a residue after evaporation from industrial vitamin C fermentation on chemical and microbial properties of alkali-saline soil[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2014, 27(Suppl):1069-1074.
- [7] 李多美,孔涛,陈曦,等. 古龙酸母液混制肥和草席覆盖措施对新疆旱区牧草生长和土壤养分含量的影响[J]. 生态环境学报,2024,33(4):548-559.
LI Duomei, KONG Tao, CHEN Xi, et al. Effects of residue after evaporation mixed fertilizer and grass mat mulching measures on the growth and soil nutrient content of pasture grasses in the dry zone of Xinjiang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(4):548-559.
- [8] 高熙桦,孔涛,李华孙,等. 古龙酸母液、木霉菌与活性污泥配施对砭石山黑麦草生理特性及土壤微生物性质的影响[J]. 生态环境学报,2023,32(9):1709-1718.
GAO Xichen, KONG Tao, LI Huasun, et al. Effect of combined application residue after evaporation, trichoderma longibrachiatum and activated sludge on physiological characteristics of perennial ryegrass and soil microbial properties in gangue hill[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(9):1709-1718.
- [9] 王冰. 维C废液与菌渣对土壤速效养分和植物维C的影响及机制[D]. 沈阳:中国科学院大学,2022:95-96.
- [10] 高子滢,王海燕,张亦凡. 土壤碳氮磷化学计量特征及其驱动因素[J]. 浙江农林大学学报,2025,42(3):645-656.
GAO Ziyong, WANG Haiyan, ZHANG Yifan. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics and driving factors: a review[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(3): 645-656.
- [11] 吴珊薇,吴金芝,赵凯男,等. 灌溉、耕作和施氮对旱地农田土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报,2024,44(22):10377-10390.
WU Shanwei, WU Jinzhi, ZHAO Kainan, et al. Effects of irrigation, tillage, and nitrogen application on soil ecological stoichiometry characteristics in dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22):

- 10377-10390.
- [12] 程昊天,孔涛,吕刚,等.不同林龄樟子松人工林土壤-针叶-微生物生态化学计量及稳态性特征[J].生态学报,2022,41(5):887-894. CHENG Haotian, KONG Tao, LYU Gang, et al. The soil-needle-microbe ecological stoichiometry and homeostasis in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different stand ages[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 887-894.
- [13] 谢媛,王昕,刘静,等.辽宁阜新蒙古族自治县雷暴气候统计特征分析[J].中国农学通报,2015,31(25):255-258. XIE Yuan, WANG Xin, LIU Jing, et al. Analysis of statistical characteristics of thunderstorm in Fuxin Mongolian autonomous county of Liaoning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 255-258.
- [14] 蒋蒙蒙,罗根华,吕刚,等.辽西北不同沙化程度草地饱和导水率及其影响因素[J].灌溉排水学报,2024,43(10):46-54. JIANG Mengmeng, LUO Genhua, LYU Gang, et al. Saturated soil hydraulic conductivity and its determinants in grassland with varying levels of desertification in Northwest Liaoning Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(10): 46-54.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2002:11-19.
- [16] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006, 26(3):901-913. LIU Zhanfeng, FU Bojie, LIU Guohua, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901-913.
- [17] 彭亚敏,武均,蔡立群,等.免耕及秸秆覆盖对春小麦-土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2021,40(4):1062-1072. PENG Yamin, WU Jun, CAI Liqun, et al. Effects of no-tillage and straw mulching on carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in spring wheat and soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1062-1072.
- [18] FOX T R, COMERFORD N B, MCFEE W W. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(6): 1763-1767.
- [19] 李奕霏.长期施肥处理下不同深层稻田土壤有机碳周转特征[D].长沙:中南林业科技大学,2019:5-9.
- [20] 潘纪源,董庆龙,温海彬,等.巨大芽孢杆菌菌剂对苹果产量、品质及土壤微生物的影响[J].园艺学报,2023,50(11):2453-2465. PAN Jiyuan, DONG Qinglong, WEN Haibin, et al. Effects of bacillus megaterium on yield, quality and soil microorganism of apple[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(11): 2453 - 2465.
- [21] 葛小艺,高明夫,徐慧.维生素C工业废母液对不结球白菜氮素利用及品质的影响[J].生态学报,2024, 43(8): 2448-2454. GE Xiaoyi, GAO Mingfu, XU Hui. Effects of industrial vitamin C production-residue after evaporation on nitrogen utilization and quality of non-heading Chinese cabbage[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(8): 2448-2454.
- [22] 孔涛,林俊杰,伏虹旭,等.低分子量有机酸对土壤微生物碳源代谢特征的影响[J].环境化学,2017,36(2):365-372. KONG Tao, LIN Junjie, FU Hongxu, et al. Effect of low molecular weight organic acids on metabolic characteristic of soil microbes to carbon sources[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 365-372.
- [23] CHENG H T, GAO M F, YANG W C, et al. Combined application of organic wastes and *Trichoderma longibraciatum* to promote vegetation restoration and soil quality on mining waste dump sites [J]. Plant and Soil, 2025, 508(1): 567-588.
- [24] 程昊天,孔涛,吕刚,等.不同林龄樟子松人工林根际与非根际土壤生态化学计量特征[J].浙江农林大学学报,2021, 38(5): 1058-1065. CHENG Haotian, KONG Tao, LYU Gang, et al. Ecological stoichiometric characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different ages [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2021, 38(5): 1058-1065.
- [25] 胡文杰,韦秋思,刘世男,等.不同林分密度对西南桦人工林根际与非根际土壤养分的影响[J].西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(3): 131-140. HU Wenjie, WEI Qiusi, LIU Shinan, et al. Rhizosphere and non-rhizosphere soil nutrient characteristics of *Betula alnoides* plantation with different stand densities[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2025, 45(3): 131-140.
- [26] 李汝振,李雯,杨柳,等.氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤养分的影响[J].林业科学研究,2024,37(5):195-204. LI Ruzhen, LI Wen, YANG Liu, et al. Effects of nitrogen addition on soil nutrients in the rhizosphere and non rhizosphere of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Forest Research, 2024, 37(5): 195-204.
- [27] 孙美美,田丽,乔紫薇,等.内蒙古砬砬岩地区沙棘根际和非根际土壤理化性质及真菌群落特征[J].微生物学报,2024, 64(6): 1747-1765. SUN Meimei, TIAN Li, QIAO Ziwei, et al. Physicochemical properties and fungal community characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hippophae rhamnoides* in Pisha sandstone area of Inner Mongolia[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(6): 1747-1765.
- [28] 胥春卓,阿山江·伊米尼江,刘丛,等.不同休眠类型紫花苜蓿根际与非根际土壤理化性质及化学计量特征[J].草地学报,2022,30(4):957-965. ZAN Kanzhuo, Ashanjiang·Yiminijiang, LIU Cong, et al. Physicochemical properties and stoichiometric characteristics of rhizosphere and bulk soils of alfalfa of different fall dormancy types[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 957-965.
- [29] 曹雯婕,李玉强,陈银萍,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征[J].应用生态学报,2022,33(12):3312-3320. CAO Wenjie, LI Yuqiang, CHEN Yinping, et al. Soil stoichiometry characteristics under different land use types in the Horqin Sandy Land, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3312-3320.
- [30] JIANG J, LI Y K, WANG M Z, et al. Litter species traits, but not richness, contribute to carbon and nitrogen dynamics in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1): 931-941.
- [31] GÜSEWELL S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2024, 164(2): 243-266.