酒石酸添加对复垦土壤呼吸作用的影响

张治国[1], 汪啸宇[1], 郑永红[1,2], 尹小宇[1], 王 格[1], 张自阳[1], 朱紫怡[1]
(1.安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2.安徽理工大学
安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: [目的] 探究酒石酸(TA)作为改良剂对复垦土壤呼吸作用的影响,旨在揭示酒石酸添加下土壤呼吸的动态变化规律及其与环境因子的交互作用。[方法] 以安徽省淮南市西北部潘一矿复垦区土壤为研究对象,采用梯度控制试验设计,设置TA添加量梯度及浓度梯度,并耦合温度与土壤含水率双环境因子梯度,对复垦土壤呼吸速率进行长期连续定位监测。[结果] ①与TA添加量为0相比,TA添加量低于675 mg/kg时,表现为促进复垦土壤呼吸作用。TA添加量高于675 mg/kg时,则表现为对复垦土壤呼吸具有抑制作用。②当土壤温度、含水率发生改变时,向复垦土壤添加TA,培养期间复垦土壤的CO_2日呼吸累积量呈现先快速上升后下降的变化趋势。温度组对复垦土壤呼吸作用的促进作用表现为:35 ℃ TA>25 ℃TA>15 ℃ TA,含水率组表现为25% TA>15% TA>35% TA。当温度为35℃时,培养20 d的平均日呼吸累积量较对照(CK)组提高了11.03倍;含水率为25%时,较CK组提高了5.14倍。③冗余分析表明,TA浓度是影响复垦土壤呼吸作用的关键因子,其次是温度。[结论] 适量添加TA能够显著提高复垦土壤的CO_2呼吸速率并驱动土壤养分含量的动态变化。优化复垦土壤的理化与生物学性状,有利于复垦土壤的长期稳定利用。

关键词: 复垦土壤; 酒石酸; 改良剂; 土壤呼吸速率; 理化性质
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0278-08 **中图分类号:** S153

文献参数: 张治国, 汪啸宇, 郑永红, 等.酒石酸添加对复垦土壤呼吸作用的影响[J].水土保持通报,2026,46(4):278-285. Zhang Zhiguo, Wang Xiaoyu, Zheng Yonghong, et al. Effects of tartaric acid addition on respiration of reclaimed soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):278-285.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.010 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.010**

Effects of tartaric acid addition on respiration of reclaimed soil

Zhang Zhiguo[1], Wang Xiaoyu[1], Zheng Yonghong[1,2], Yin Xiaoyu[1], Wang Ge[1], Zhang Ziyang[1], Zhu Ziyi[1]
(1.*School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui* 232001, *China*; 2.*Anhui Province Engineering Laboratory of Water and Soil Resources Comprehensive Utilization and Ecological Protection in High Groundwater Mining Area, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui* 232001, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of tartaric acid (TA) as an amendment on the respiration of reclaimed soil were investigated in order to reveal the dynamic variation patterns of soil respiration under TA addition and its interactive effects with environmental factors. [Methods] Taking the reclaimed soil from the Panyi mine reclamation area in northwestern Huainan City, Anhui Province as the research object, a gradient-controlled experimental design was adopted. Gradients of TA application rate and concentration were systematically set, coupled with dual environmental factor gradients of temperature and soil moisture content, so as to conduct long-term continuous in-situ monitoring of the respiration rate of reclaimed soil. [Results] ① Compared with the control group (TA application rate = 0), TA addition at a rate lower than 675 mg/kg promoted the respiration of reclaimed soil. In contrast, TA addition at a rate higher than 675 mg/kg exhibited an inhibitory effect on respiration of reclaimed soil. ② When soil temperature and moisture content changed, the daily cumulative CO_2 respiration of reclaimed soil showed a trend of first rapidly increasing and then decreasing during the incubation

收稿日期:2025-11-19 **修回日期:**2026-01-19 **采用日期:**2026-01-21
资助项目:国家自然科学基金项目"外源溶解性有机碳对镉在复垦重构土壤中吸附机制研究"(51904014);安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程研究中心开放基金资助课题(2023-WSREPMA-07);安徽省院士工作站开放基金(2022-AWAP-01)
第一作者:张治国(1978—),男(汉族),陕西省咸阳市人,正高级实验师,博士,主要从事土壤碳循环及矿区水土污染控制与修复研究。Email:zzgaust@aust.edu.cn。

period after TA addition. The promoting effect of TA on respiration of reclaimed soil followed the order of temperature groups: 35 ℃ TA > 25 ℃ TA > 15 ℃ TA, and the order of moisture content groups: 25% TA > 15% TA > 35% TA. At 35 ℃, the average daily cumulative respiration over the 20-day incubation was 11.03 times higher than that of the CK group, while at 25% soil moisture content, it was 5.14 times higher than that of the CK group. ③ Redundancy analysis (RDA) indicated that TA concentration was the key factor affecting the respiration of reclaimed soil, followed by temperature. [Conclusion] Appropriate addition of TA can significantly increase the CO_2 respiration rate of reclaimed soil, drive the dynamic changes of soil nutrient content, and optimize the physicochemical and biological properties of reclaimed soil, thereby contributing to the long-term stable utilization of reclaimed soil.

Keywords: reclaimed soil; tartaric acid; amendment; soil respiration rate; physicochemical properties

煤炭长期处于中国能源主体地位,约占一次能源生产与消费的60%,是中国能源安全的压舱石[1]。近年来随着煤炭开采规模和强度的增大,特别是中国东部平原矿区多采用井工开采方式,导致大面积土地塌陷,严重破坏土地资源[2]。受损的土地需要进行土壤复垦,即地形地貌的重塑,土壤结构的重建以及土壤功能的恢复。塌陷土地功能的恢复不仅关乎土地资源的可持续利用,更与碳汇功能紧密相关。在采煤塌陷区土地复垦治理过程中,由于施工工艺的限制,表土剥离回填破坏了土壤原始结构和剖面层次,复垦后土壤肥力下降,微生物结构和活性受限,导致土壤呼吸作用发生较大变化[3],进而影响碳排放和碳循环的效率[4]。

土壤呼吸是土壤向大气中释放二氧化碳的过程[5]。每年土壤通过呼吸作用排放到大气中的总碳量为6.80×10^{13} kg,而全球每年焚烧燃料释放到大气中的碳则低得多,是土壤呼吸作用释放碳的8%~9%[6]。土壤呼吸受到多种环境因子的制约,土壤水分、温度以及其自身的理化性质,都会对土壤呼吸产生一定的影响。Zou Junliang 等[7]对爱尔兰中部北美云杉人工林土壤进行连续监测,发现土壤呼吸速率的季节变化特征显著,夏季最高,冬季最低,且与土壤温度呈正相关,与土壤含水量呈负相关。刘英等[8]以红沙泉露天矿为研究对象,发现矿区内不同地物类型和不同深度土壤呼吸速率差异显著,不同深度土壤呼吸对土壤温度等环境因子的响应存在差异。郑永红等[9]研究采煤沉陷区复垦土壤呼吸季节特征,发现在季节尺度上土壤温度(10 cm)、大气温度和土壤含水率均是土壤呼吸速率重要的环境调控因子。因此,土壤呼吸在一定程度上反映了土壤的生物学特性以及土壤中的物质代谢强度,并且是表征土壤质量和土壤肥力的重要指标。

近年来,有机酸因其对土壤理化性质及微生物活性的调控作用,逐渐成为土壤改良研究的热点。有机酸作为一类结构多样的土壤改良功能物质,在调控土壤酸碱平衡,活化难溶性养分等方面展现出显著优势。但同时存在施用量阈值要求高,不当施用易引发生态副作用等局限性[10]。低分子量有机酸还可通过酸化作用促进土壤矿物溶解,释放其中固持的养分元素,同时为土壤微生物提供碳源,进而刺激微生物代谢活性,改善土壤微生态环境[11-12]。相对于农田土壤,复垦土壤中有机酸组成种类较多(可检测出9种),但有机酸含量相对偏低,酒石酸(TA)和草酸为优势有机酸[13]。TA是一种典型的二元羧酸,普遍存在于植物根际土壤环境中,是累积浓度较高的小分子有机酸[14]。其独特的分子结构可能通过络合金属离子,调节土壤微环境等方式影响土壤质量。目前,TA在土壤生态修复中的研究大多集中在重金属污染的化学修复,重金属形态调控,植物修复辅助,微生物活性及群落结构中[15-16]。然而,TA作为土壤改良剂,其添加量与土壤呼吸及环境因子间耦合关系的相关研究较少,其机制尚不明确。

本研究以煤矿复垦土壤为对象,采用TA作为土壤改良剂,研究TA添加条件下复垦土壤CO_2呼吸速率的动态规律及其与环境因子(如温度、含水率)的耦合作用,并探讨了TA添加与复垦土壤呼吸、养分的耦合关系,为煤矿复垦区碳排放及其控制提供一定理论依据和参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

潘一矿复垦区位于安徽省淮南市西北部的潘一矿东侧约1 km处,南部毗邻一处煤矸石堆积山体(图1)。该地处亚热带与暖温带过渡区,属四季分明的季风气候,年均温15.3 ℃,年降水量937.2 mm,年日照时数2 239.2 h,无霜期223.7 d。淮南矿业集团从2005年开始,陆续对矿区采煤塌陷区实施了地质环境治理即土地复垦。其中潘一矿土地复垦工程采用剥离表土,回填煤矸石的措施,将表土回填至指定标高并平整土地。该项工程治理塌陷地37.96 hm^2,

完成土石方8.59×10^5 m^3，复垦土壤厚度达到1～1.2 m。复垦区土壤类型以砂姜黄土为主，成土母质为黄河性古河流沉积物，质地黏重且普遍存在砂礓层结构[17]。

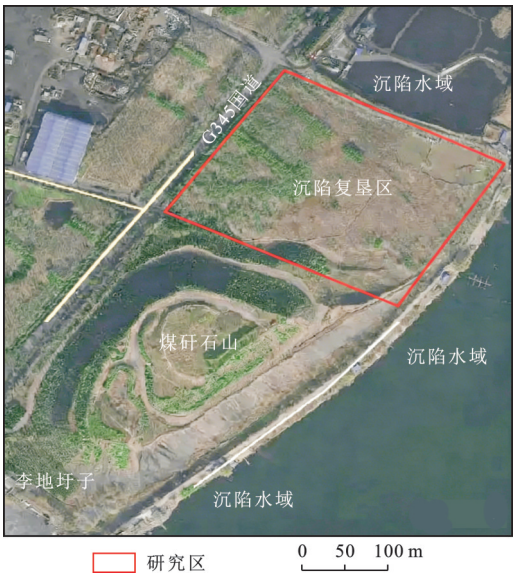


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of study area

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集与预处理

2023年5月采集潘一矿煤矸石充填复垦区土壤，使用随机布点法，采取0—10 cm的表层土壤。于实验室中将土壤样品中的细根碎屑全部挑出，充分混匀，自然风干后进行研磨并过2 mm(10目)筛备用。

1.2.2 试验设计与样品测定

(1) TA添加对复垦土壤CO_2呼吸速率的影响：称取300 g过2 mm筛网后的复垦土壤于广口培养瓶中，向复垦土壤中分别添加TA质量浓度为0，75，150，300，375，450，525，675，750，825 mg/kg，将所有试验样品均置于25 ℃的恒温培养箱中进行培养。

(2) 温度、含水率对复垦土壤CO_2呼吸速率的影响：称取300 g经过2 mm筛网后的复垦土壤样品于广口培养瓶中，对照组(CK)取等量超纯水替代TA添加至复垦土壤中。基于本课题组前期试验结果[18]和土壤物理条件(如土壤温度等)，选取20 mmol/L作为TA添加浓度，温度组设置梯度为15，25，35 ℃，保持含水率固定为25%；含水率梯度为15%，25%，35%。保持温度固定为25 ℃；培养时间20 d。

培养期间，利用土壤碳通量自动测量系统(型号：LI-7810)，每天固定时间测定复垦土壤CO_2呼吸速率，并计算复垦土壤CO_2日呼吸速率。复垦土壤CO_2呼吸速率计算公式为

$$F_c=\frac{10\times VP_0\left(1-\frac{W_0}{1\,000}\right)}{8.314S(T_0+273.15)}\times\frac{\partial c}{\partial t} \tag{1}$$

式中：F_C为复垦土壤CO_2瞬时呼吸速率〔μmol/(m^2·s)〕；V为总体积(cm^3)；P_0为初始大气压(kPa)；W_0为初始H_2O浓度(mmol/mol)；T_0为初始空气温度(℃)，$\frac{\partial c}{\partial t}$为干$CO_2$初始变化速率(μmol/mol)；$S$为土壤表面积(cm^2)。

复垦土壤CO_2日呼吸累积量计算公式为

$$F_d=\frac{F_C S}{10^4\,\mathrm{m}}\times 44\times 24\times 3\,600 \tag{2}$$

式中：F_d为复垦土壤CO_2日呼吸累积量〔μg/(g·d)〕，m是土壤干重(g)，44为CO_2摩尔质量，24×3 600为24 h的秒数。

1.2.3 测试方法及仪器

在培养结束后，土壤酸碱度(pH值)采用电位法测定(HJ 962—2018，梅特勒FE28酸度计)，土壤有机质(SOM)采用元素分析仪法测定(NY/T 4606—2025，Elementar Vario EL cube元素分析仪)，土壤碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定(LY/T 1228—2015)，土壤有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法分光光度计法(HJ 704—2014，普析通用TU-1950紫外可见分光光度计)，土壤速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法测定(DB63/T 1820—2020，Avio 550 max ICP-OES)。

1.2.4 数据处理及质量控制

采用SPSS 24.0对数据进行统计分析，采用Origin 2025绘制图形，采用Canoco 5软件分析探究F_d，复垦土壤的理化性质与TA浓度和各环境因子(温度和含水率)之间的相关性。复垦土壤理化及速效养分性质测试过程中采用安徽潮土土壤有效成分标准物质〔GBW07461(ASA-10)〕进行质量控制。

2 结果与分析

2.1 酒石酸添加量对复垦土壤CO_2呼吸速率的影响

向复垦土壤中添加TA并进行培养，复垦土壤CO_2瞬时呼吸速率F_C的变化如图2所示。F_C随着TA添加量的增加呈现先上升后下降的变化趋势。TA添加量为300 mg/kg时，F_C达到最大值0.307 μmol/(m^2·s)。TA添加量为675 mg/kg时，F_C为0.198 μmol/(m^2·s)，与TA添加量为0时的F_C为0.197 μmol/(m^2·s)数值基本持平。总体上，TA添加量低于675 mg/kg时，表现为促进土壤呼吸。TA添加量高于675 mg/kg时，复垦土壤CO_2瞬时呼吸速率

呈现快速下降的趋势,并且逐渐趋于 0 μmol/(m²·s),表现出对土壤呼吸作用的抑制。

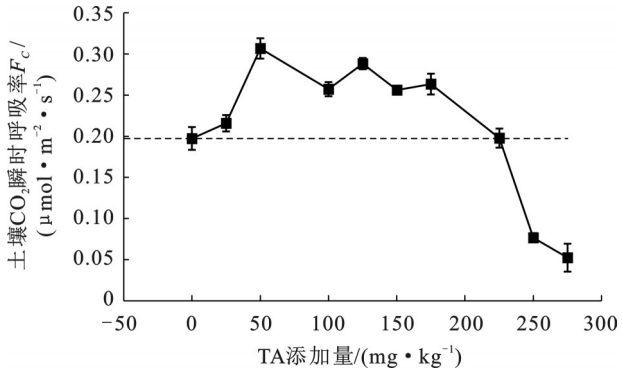


图 2　酒石酸(TA)添加量对复垦土壤 CO_2 瞬时呼吸速率的影响

Fig.2　Effects of tartaric acid (TA) addition on instantaneous CO_2 respiration rate of reclaimed soil

2.2　环境因子对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量的影响

温度对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量的影响如图 3所示,在不同温度条件下,F_d 的变化趋势接近,15 ℃ TA,25 ℃ TA,35 ℃ TA 组 F_d 的最大值分别为 0.486,0.655,0.992 μg/(g·d);15 ℃ TA,25 ℃ TA,35 ℃ TA 组复垦土壤 CO_2 日平均呼吸累积量(培养期间 F_d 的平均值)分别为 0.185,0.332,0.349 μg/(g·d),相较于同温度下 CK 组分别提高了 2.42,4.26,11.03 倍。改变温度,TA 添加后对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量影响由高到低排序为:35 ℃ TA>25 ℃ TA>15 ℃ TA。

含水率对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量的影响见图 4。不同含水率条件下,15% TA,25% TA,35% TA 组 F_d 的最大值分别为 0.566,1.199,0.763 μg/(g·d)。15% TA,25% TA,35% TA 组复垦土壤 CO_2 日平均呼吸累积量分别为 0.262,0.405,0.248 μg/(g·d),其相较于同含水率 CK 组分别提升了 5.09,5.14,4.94 倍。TA 添加浓度相同条件下,改变土壤含水率,复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量由高到低排序为 25% TA>15% TA>35% TA。

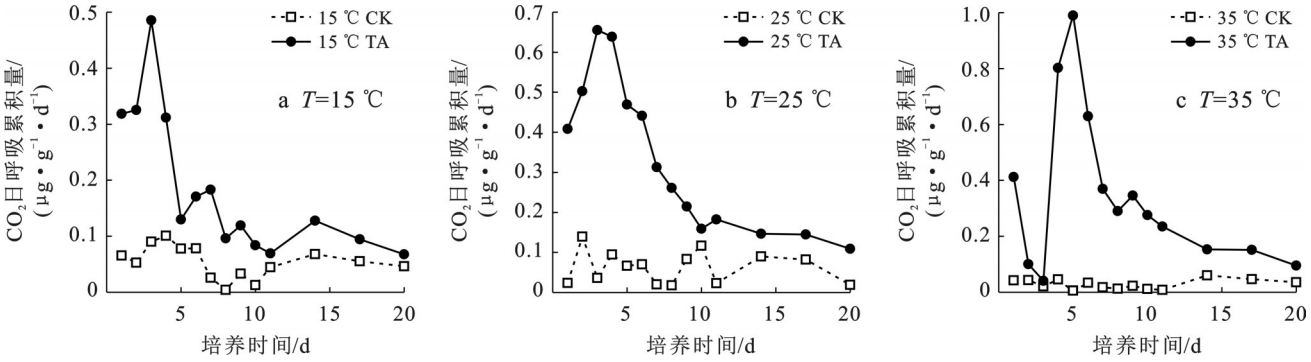


图 3　温度(T)对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量的影响

Fig.3　Effects of temperature (T) on daily cumulative CO_2 respiration of reclaimed soil

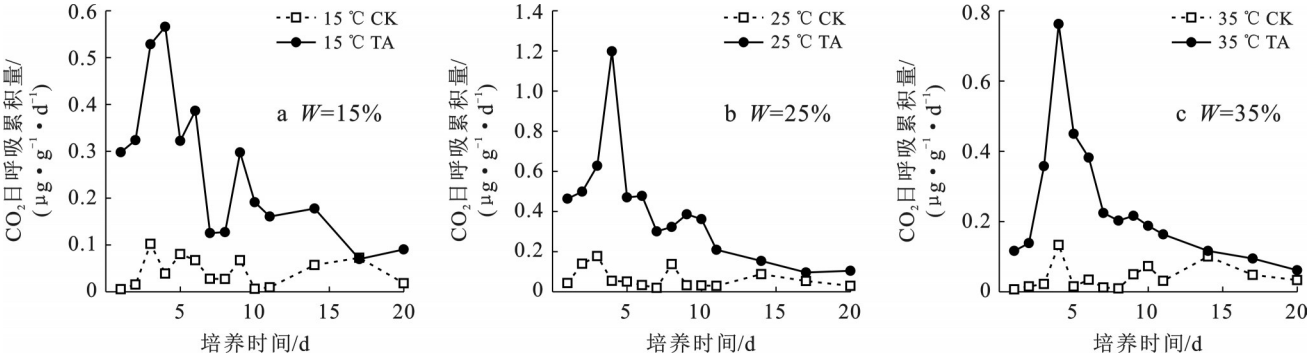


图 4　含水率(W)对复垦土壤 CO_2 日呼吸累积量的影响

Fig.4　Effects of soil moisture content (W) on daily cumulative CO_2 respiration of reclaimed soil

2.3　酒石酸添加对复垦土壤理化性质的影响

TA 添加对土壤 pH 值的影响如图 5a 所示,在初期阶段 CK 组 pH 值为 8.11。随着 TA 浓度的增加,复垦土壤初期 pH 值逐渐降低,当 TA 浓度为 20 mmol/L 时,复垦土壤的 pH 值为 6.53,表明 TA 添加已经导致复垦土壤酸化。经过 20 d 的培养,TA-5,TA-10 和 TA-20 组的复垦土壤 pH 值分别为 8.35,8.23,8.05,pH 值恢复至 8 以上,但仍低于 CK 组的复垦土壤 pH 值 8.68。

从图 5b 可以看出,添加 TA 后,初期复垦土壤中

的碱解氮浓度也会升高，但随着TA浓度的增加，其碱解氮的浓度先上升后下降。培养至20 d时，CK，TA-5，TA-10和TA-20组的复垦土壤碱解氮浓度分别为54.1，59.47，47.59，39.17 mg/kg，可以发现，TA-5组末期的碱解氮浓度高于初期含量，但TA-10组和TA-20组的末期碱解氮浓度均低于初期含量，且TA浓度越高，其浓度降低越显著。

图5c反映复垦土壤速效钾在培养初末期的浓度情况。随着TA浓度的增加，土壤中的速效钾浓度降低，但TA-5组的速效钾浓度高于CK组，TA-10和TA-20组的速效钾含量低于CK组。培养末期时，TA-5，TA-10和TA-20组速效钾浓度分别为296.18，338.21，337.48 mg/kg，均高于CK组末期的速效钾浓度。但TA-5组末期的速效钾浓度低于初期。

有机质浓度的变化见图5d。可以看出，培养初期复垦土壤添加TA后的有机质浓度高于CK组。且在培养末期测定复垦土壤有机质浓度发现，随着TA浓度的升高，有机质的浓度也增加，TA-5，TA-10和TA-20组的有机质浓度在末期分别达到7.63，7.89，8.2 g/kg。

图5e为复垦土壤培养初末期有效磷浓度变化。TA-5和TA-10组的有效磷在初末期变化较大，TA-5组末期有效磷高于初期，浓度达到4.31 mg/kg，而TA-20组末期有效磷低于初期浓度，为3.86 mg/kg。在培养末期可以看出，随着TA浓度的升高，复垦土壤有效磷呈下降趋势，但下降幅度很小。

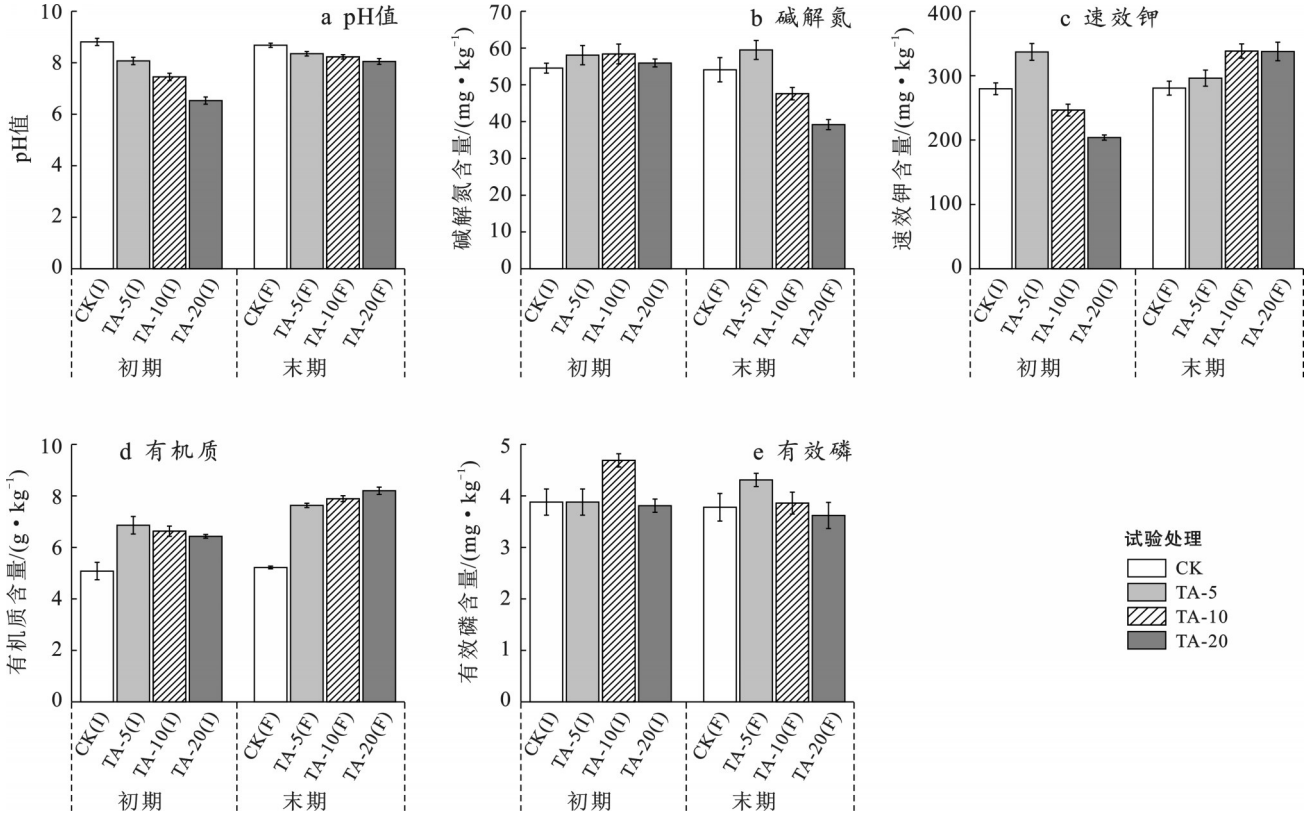


图5 酒石酸(TA)影响下复垦土壤样品理化性质指标

Fig.5 Physicochemical property indicators of reclaimed soil samples affected by tartaric acid (TA)

2.4 复垦土壤F_d，TA浓度、理化性质与环境因子的冗余分析

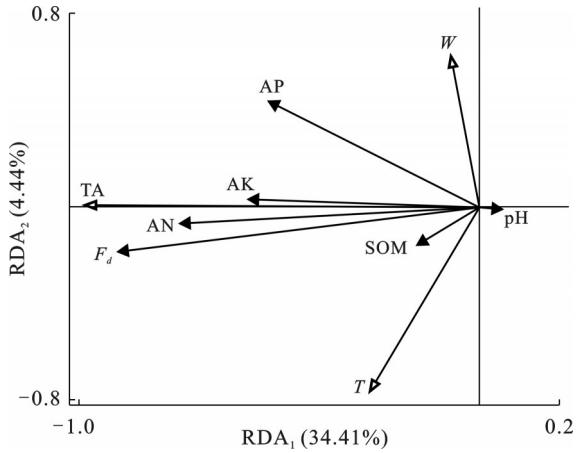
复垦土壤F_d，TA浓度，理化性质(碱解氮AN、速效钾AK、有效磷AP和有机质SOM)、环境因子(温度T和含水率W)之间的关系见图6。冗余分析结果表明，环境因子稳定性指标可以解释38.85%的复垦土壤F_d以及理化性质的变化(F=5.2，p=0.002)，其中第一轴和第二轴的解释量分别为34.41%和4.44%。结果表明，TA浓度与F_d，AN和AK呈较强的正相关，与pH值呈负相关；温度与F_d，SOM，AN呈正相关，与pH值呈负相关。

3 讨 论

3.1 酒石酸和环境因子变化对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是表征土壤活性和土壤肥力的重要指标之一。复垦土壤的呼吸速率随着TA浓度的增加先升高后降低。TA作为低分子量有机酸，能够活化微生物活性，同时也能作为碳源，通过多途径协同作

用,显著提高微生物呼吸速率和CO_2累积排放量[19]。但随着浓度不断提高,土壤酸性增强,破坏了土壤微生物环境,导致呼吸速率下降。实际应用中需注意控制 TA 添加量小于 675 mg/kg,避免过量添加导致土壤酸化,破坏土壤理化性质。



注:F_d为复垦土壤日呼吸累积量; TA 为酒石酸浓度; T为温度; W为含水率; AN为碱解氮; AK为速效钾; AP为有效磷; SOM为有机质; pH为酸碱度。

图 6　复垦土壤 CO_2呼吸速率及理化性质与环境因子的 RDA 分析

Fig.6　RDA of CO_2 respiration rate, physicochemical properties and environmental factors of reclaimed soil

土壤呼吸与温度和水分存在一定的相关性。随着温度的升高,添加 TA 后复垦土壤的CO_2呼吸速率也增加。在 15～35 ℃内,温度和土壤CO_2呼吸速率呈正反馈的关系。添加 TA 后提升了土壤中的有机质含量,为土壤微生物提供了碳源,加速了土壤微生物代谢过程,提高了土壤呼吸对温度变化的响应,从而提高了土壤呼吸的温度敏感性。Maia 等[20]在研究温度对土壤的有机质分解过程中重量和碳的气态损失的影响时认为,有机质分解的最优温度区间为 25～35 ℃;随着温度升高或长期增温,土壤呼吸速率的增幅会下降甚至停止,土壤呼吸对温度敏感度会下降[21]。本试验发现,温度为 35 ℃时,TA 对复垦土壤呼吸作用的影响更为显著。

在土壤含水率为 15%～35% 内,TA 添加后的复垦土壤CO_2呼吸速率先增加后下降,含水率为 25% 时,TA 对复垦土壤呼吸作用的影响更为显著。土壤含水量对土壤呼吸的影响主要呈非线性关系。在较低含水量时,增加土壤水分可以提高土壤呼吸速率。因为水分是土壤微生物活动和正常生理功能所必需的。但当土壤含水量超过一定阈值后,过高的含水量可能会限制土壤中的氧气扩散,造成土壤缺氧环境,从而抑制土壤呼吸作用[22]。

3.2　酒石酸添加对土壤理化性质的影响

添加 TA 后土壤的理化性质发生改变。TA 浓度和 SOM 呈正相关,TA 浓度较低时,通常表现为促进土壤有机质分解释放养分,但同时低浓度有机酸可作为微生物的速效碳源与能源,促进微生物的生长繁殖[23]。马兰心等[24]在镉污染土壤中施用 187.6 mg/kg TA 时发现,土壤微生物群落丰度提升 20%～30%,微生物量碳占总有机质比例从 2.1% 增至 3.5%,直接促进了有机质含量的积累。这表明低浓度 TA 添加,土壤中微生物合成速率大于有机质矿化速率,最终表现为土壤总有机质的净积累。TA 浓度较高时,对微生物酶活性起到一定的钝化作用。同时 TA 的羧基和羟基可与土壤腐殖质中的酚羟基、氨基发生氢键结合和络合,将有机质转化为更稳定的腐殖质组分[25]。此时 TA 添加更多地表现为促进了土壤有机质的稳定化。本研究结果表明,TA 添加可以显著增加土壤 SOM 含量。但是 SOM 增加是因为 TA 在土壤残留量还是微生物活性的贡献,后续需要进一步细化试验方案加以验证。低分子量有机酸会提高土壤 AN 的含量,有机酸作为易降解碳源,激发微生物活性,加速有机氮矿化。但随着微生物增殖,需要大量生物氮,导致后期 AN 含量降低[26]。复垦土壤添加 TA 后,TA 会释放游离的H^+离子,与土壤中的碱性物质中和,使土壤 pH 值降低。但是,随着培养时间推移,在土壤自身的缓冲体系与土壤中的细菌等微生物的耦合作用下,TA 被逐步分解,在土壤中的浓度持续下降,酸化效应不断减弱,从而引起 pH 值的回升[27]。TA 添加后,AK 的含量虽然在培养初期水平较低,但在培养末期,其水平均高于对照组的水平,这和汪梦甜[28]的研究一致,可能由于 TA 通过酸化、还原、配位交换作用促进了钾的释放。培养末期 AP 的含量与对照组水平差异不大,TA 在中性至碱性土壤中对磷的释放效果较弱[29]。

3.3　土壤理化性质变化对土壤呼吸作用的影响效应与 RDA 分析的局限性

TA 改变了土壤理化性质(土壤 pH, SOM, AN, AK 等),促进微生物活性、有机质分解效率及根系代谢状态,间接反馈影响土壤呼吸过程[30]。土壤呼吸的核心驱动力是微生物的异养呼吸,而微生物的生长代谢对土壤 pH 值高度敏感。对于碱性复垦土壤,少量 TA 的酸化作用可优化微生物环境,加速底物的酶促分解过程,提高了土壤的呼吸速率。其次,SOM 是土壤呼吸的核心底物,其含量与组分直接决定呼吸速率的高低。试验结果显示,TA 处理显著增加了 SOM 含量,通过调控呼吸底物供给量反馈影响土壤呼吸。

此外，冗余分析（RDA）仅能解释38.85%的F_d及理化性质变化，土壤呼吸速率变化未能被较全面解释，表明存在一定局限性。RDA分析应结合其他重要环境因子（如土壤微生物群落结构、酶活性、土壤容重等）来进一步增加解释度。

4 结 论

适量添加TA能够显著提高复垦土壤的CO_2呼吸速率。TA添加量低于675 mg/kg时，表现为促进土壤呼吸作用；TA添加量高于675 mg/kg时，表现为抑制土壤呼吸作用。添加TA后，土壤温度对复垦土壤呼吸作用的影响大小依次为：35 ℃ TA＞25 ℃ TA＞15 ℃ TA。土壤含水率影响复垦土壤呼吸作用大小依次为：25% TA＞15% TA＞35% TA。冗余分析表明，TA浓度是影响复垦土壤呼吸作用和理化性质的关键因子，温度次之。因此，TA作为土壤改良剂，应该科学管控其施用量阈值，注意调控土壤酸碱平衡，促进土壤中难溶性养分元素活化，提升复垦土壤质量，为煤矿塌陷区土地复垦及土壤质量的生态修复提供技术支撑。

参考文献（References）

[1] 王双明，孙强，胡鑫，等.煤炭开采地质体复合损害与减损保障[J].煤田地质与勘探，2025，53(1)：1-11.
Wang Shuangming, Sun Qiang, Hu Xin, et al. Coal mining-induced composite damage to geological bodies and geological guarantee against damage reduction [J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 1-11.

[2] 陈浮，朱燕峰，马静，等.东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J].煤炭学报，2023，48(7)：2836-2849.
Chen Fu, Zhu Yanfeng, Ma Jing, et al. Cooperative remediation mechanism and key technologies for pollution reduction and carbon sequestration in coal mining subsidence areas of the eastern plain [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2836-2849.

[3] 郑永红，张治国，陈永春，等.人工林树种对矿区复垦土壤肥力质量影响及评价研究[J].煤炭科学技术，2020，48(4)：156-168.
Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Chen Yongchun, et al. Study on effect and evaluation of tree species on reclamation soil fertility quality in coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 156-168.

[4] 张小平，李梓琛，王瑜，等.矿区复垦地人工生态系统碳汇能力与生物多样性功能协同效益解析[J].煤炭科学技术，2024，52(7)：257-266.
Zhang Xiaoping, Li Zichen, Wang Yu, et al. Synergistic benefit analysis of carbon sink capacity and biodiversity function of artificial ecosystems in mining reclamation sites [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 257-266.

[5] 曹星淼，郭超群，张新娜，等.氮添加对东北人工幼龄混交林土壤呼吸的影响[J].生态学报，2025，45(8)：3874-3886.
Cao Xingmiao, Guo Chaoqun, Zhang Xinna, et al. Effects of nitrogen addition on soil respiration in artificial young mixed forest in northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3874-3886.

[6] 耿增超，贾宏涛.土壤学[M].2版.北京：科学出版社，2020.
Geng Zengchao, Jia Hongtao. Soil science [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2020.

[7] Zou Junliang, Liu Xinmei, Kevitt K M, et al. Decadal variation in soil respiration in a *Sitka spruce* plantation in central Ireland and its temperature sensitivity [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 374: 110828.

[8] 刘英，林家权，岳辉，等.荒漠化矿区不同土地利用类型土壤呼吸及其影响因子[J].煤炭学报，2023，48(7)：2893-2905.
Liu Ying, Lin Jiaquan, Yue Hui, et al. Soil respiration and its influencing factors in different land use types in desertification mining areas [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2893-2905.

[9] 郑永红，张治国，胡友彪，等.煤矿复垦重构土壤呼吸季节变化特征及其环境影响因子[J].煤炭学报，2014，39(11)：2300-2306.
Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Hu Youbiao, et al. Seasonal variation of soil respiration and its environmental effect factors on refactoring soil in coal mine reclamation area [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2300-2306.

[10] 石记博，李强，王一铭，等.不同化学改良剂及其用量改良松嫩平原盐碱土效果的试验研究[J].土壤通报，2024，55(4)：1151-1162.
Shi Jibo, Li Qiang, Wang Yiming, et al. Effects of different chemical amendments on soil salinization parameters and wheat growth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(4): 1151-1162.

[11] 张治国，谭雨柠，郑永红，等.外源有机酸对复垦土壤中重金属Cr的活化效果研究[J].金属矿山，2024(1)：285-292.
Zhang Zhiguo, Tan Yuning, Zheng Yonghong, et al. Effect of exogenous organic acids on activation of heavy metal Cr in reclaimed soil [J]. Metal Mine, 2024(1): 285-292.

[12] 陈芳玲.外源有机酸对煤矿复垦土壤钾素形态及有效性的影响[D].安徽 淮南：安徽理工大学，2023.
Chen Fangling. Effects of exogenous organic acids on

potassium form and availability in reclaimed soil of coal mine [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2023.

[13] 马程楠.外源有机酸对煤矿复垦土壤磷形态及有效性的影响[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2023.
Ma Chengnan. Effects of exogenous organic acids on phosphorus forms and availability in coal mine reclamation soil [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2023.

[14] 张怡,方国东,陈文涛,等.小分子有机酸影响土壤中活性氧自由基生成机制及环境效应的研究进展[J].土壤,2025,57(2):258-264.
Zhang Yi, Fang Guodong, Chen Wentao, et al. Research progress on mechanism and environmental effects of low molecular weight organic acids influencing generation of reactive oxygen species in soil [J]. Soils, 2025,57(2):258-264.

[15] Jiang Yuxiao, Hu Chao, Zhou Aoyu, et al. Effectiveness of various chemical leaching systems in the remediation of chromium-contaminated soil and their impact on chromium speciation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025,157:77-89.

[16] 陶荣浩,高羽欣,谢君豪,等.有机酸强化饲用玉米修复镉铅污染农田效果[J].农业环境科学学报,2024,43(4):823-834.
Tao Ronghao, Gao Yuxin, Xie Junhao, et al. Effect of organic acid enhancement on the remediation of cadmium-lead-polluted farmland by feed maize [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(4):823-834.

[17] 郑永红,张治国,姚多喜,等.煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究[J].煤炭学报,2013,38(8):1476-1483.
Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Yao Duoxi, et al. Characteristics of temporal-spatial distribution and enrichment of heavy metals in coal mine reclaimed soil [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(8):1476-1483.

[18] 李雅婷.有机酸对复垦重构土壤微生物群落结构调控机制研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2024.
Li Yating. Study on the regulation mechanism of organic acids on the microbial community structure of reclamation and reconstruction soils [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2024.

[19] Hei Jingying, Wang Shu, He Xiahong. Effects of exogenous organic acids on the growth, edaphic factors, soil extracellular enzymes, and microbiomes predict continuous cropping obstacles of *Panax notoginseng* from the forest understorey [J]. Plant and Soil, 2024, 503(1): 105-122.

[20] Maia S M F, Gonzaga G B M, dos Santos Silva L K, et al. Soil organic carbon temperature sensitivity of different soil types and land use systems in the Brazilian semi-arid region [J]. Soil Use and Management, 2019, 35(3):433-442.

[21] Bao Xiaoying, Zhu Xiaoxue, Chang Xiaofeng, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration on the Tibetan Plateau [J]. PLoS One, 2016, 11(10):e0165212.

[22] 陈文哲,黄秋香,孟凡德,等.草酸和酒石酸对稻田土壤中砷解吸行为的影响研究[J].生态环境学报,2024,33(8):1298-1305.
Chen Wenzhe, Huang Qiuxiang, Meng Fande, et al. Impacts of oxalic and tartaric acids on arsenic desorption from a paddy soil [J]. Ecology and Environment Sciences, 2024,33(8):1298-1305.

[23] 孔涛,刘民,淑敏,等.低分子量有机酸对土壤微生物数量和酶活性的影响[J].环境化学,2016,35(2):348-354.
Kong Tao, Liu Min, Shu Min, et al. Effect of low molecular weight organic acids on soil microbe number and soil enzyme activities [J]. Environmental Chemistry, 2016,35(2):348-354.

[24] 马兰心,唐棋,辜娇峰,等.酒石酸与农艺刈割联合辅助象草植物修复镉污染土壤的效应以及对土壤微生物群落的影响[J].环境科学研究,2024,37(2):359-370.
Ma Lanxin, Tang Qi, Gu Jiaofeng, et al. Tartaric acid and agronomic mowing to assist *Pennisetum purpureum* Schum in cadmium-contaminated soil phytoremediation and its effect on soil microbial community [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(2):359-370.

[25] Zhang Xiaonuo, Lu Hong, Liu Jiyan, et al. Mechanism of tartaric acid mediated dissipation and biotransformation of tetrabromobisphenol A and its derivatives in soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,471:134350.

[26] 邵微,徐国益,于会丽,等.红宝石梨园土壤微生物群落与养分对低分子有机酸的响应[J].果树学报,2023,40(3):481-493.
Shao Wei, Xu Guoyi, Yu Huili, et al. Response of soil microbial community and nutrients to low molecular weight organic acids in a Hongbaoshi pear orchard [J]. Journal of Fruit Science, 2023,40(3):481-493.

[27] 赵鹏志,陈祥伟,杨小燕,等.低分子有机酸对东北黑土酶活性与养分关系的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):105-112.
Zhao Pengzhi, Chen Xiangwei, Yang Xiaoyan, et al. Relationship between enzyme activities and nutrients of black soil subjected to low molecular organic acid [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018,42(1):105-112.

(下转第 309 页)