

添加不同配比客土对改良铁矿废石复垦土壤碳排放的影响

康 营¹, 赵文廷², 张俊梅¹, 冯 哲¹, 谢梦姣², 刘腾腾¹, 刘 琦², 王 洋²

(1.河北农业大学资源与环境科学学院,河北 保定 071000;2.河北农业大学国土资源学院,河北 保定 071000)

摘要: 添加客土配比的不同对铁矿废石复垦土壤的改良效果和经济成本有重要影响,为明确不同配比客土处理下铁矿废石混合土碳排放的动态特征并揭示其驱动因子,于 2019 年 1—12 月采用田间试验与室内分析相结合的方法,在自然修复状态下,设置铁矿废石与客土体积比分别为 T1(1:1)、T2(1:2)、T3(1:4)和 T4(0:1)4 个处理,监测日、季节尺度下铁矿废石混合土碳排放及水热动态变化特征,并于 2019 年 4、7、10、12 月测定混合土的理化性质。结果表明:季尺度下铁矿废石混合土碳排放随温度升降表现为夏高冬低的变化特征,随客土比例增大,混合土碳排放有增强的趋势,各处理间碳排放仅在 7—9 月差异显著($P < 0.05$),表现为 $T4 > T2 > T3 > T1$;日尺度下铁矿废石混合土碳排放最高值出现在中午 12:00—14:00,最低值出现在凌晨 4:00—6:00,当混合土温度较低时,碳排放出现负值现象;随客土比例增大铁矿废石混合土碳排放敏感系数 Q_{10} 逐渐增大(2.07~2.37),添加客土在一定程度上降低混合土 pH 而增加混合土有效磷、全氮、有机碳含量和过氧化氢酶、蔗糖酶活性。综合研究铁矿废石混合土理化特性对碳排放的影响,可为铁矿复垦区土壤碳排放研究提供理论依据。

关键词: 客土; 铁矿废石; 混合土; 碳排放; 理化性质; 酶活性

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)05-0346-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.046

Effect of Foreign Soils with Different Addition Proportions on Carbon Emission in a Reclaimed Soil of Iron Ore Waste

KANG Ying¹, ZHAO Wenting², ZHANG Junmei¹, FENG Zhe¹,

XIE Mengjiao², LIU Tengting¹, LIU Qi², WANG Yang²

(1.College of Resources and Environment, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000;

2.College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: The different addition proportions of foreign soil has an important impact on the improvement effect and economic cost of iron ore waste reclamation soil. From January to December in 2019, field experiments and laboratory analysis were conducted to investigate the dynamic characteristics of soil carbon emission and reveal its driving factors. In the natural remediation state, the volume ratios of iron ore waste to foreign soil were set as T1 (1:1), T2 (1:2), T3 (1:4) and T4 (0:1), respectively. The physical and chemical properties of the mixed soil were determined in April, July, October and December 2019. The results showed that the carbon emission of mixed soil of iron ore and waste rock was higher in summer and lower in winter with the rise and fall of temperature. With the increase of the proportions of foreign soil, the carbon emission of mixed soil had an increasing trend, and the difference was significant only from July to September, which was $T4 (0:1) > T2 (1:2) > T3 (1:4) > T1 (1:1)$. On the daily scale, the maximum carbon emission appeared at 12:00—14:00 pm, and the minimum appeared at 4:00—6:00 am. When the temperature of mixed soil was low, the carbon emission appeared negative. With the increase of the proportions of foreign soil, the sensitivity coefficient Q_{10} of carbon emission of iron ore waste rock mixed soil gradually increased (2.07~2.37), and the addition of foreign soil reduced the pH values of mixed soil to a certain extent, but increased the contents of available phosphorus, total nitrogen, organic carbon and the activities of

收稿日期:2021-03-31

资助项目:河北省引进留学人员资助项目(CN201708)

第一作者:康营(1995—),女,硕士研究生,主要从事土地资源利用与环境效应研究。E-mail:757173753@qq.com

通信作者:王洋(1985—),女,博士,硕士生导师,主要从事土地利用变化与资源环境效应研究。E-mail:xiaoyiranwy85@163.com

catalase and sucrase. Comprehensive study on the effects of physical and chemical properties of mixed soil of iron ore and waste rock on carbon emission can provide a theoretical basis for the study of soil carbon emission in iron ore reclamation area.

Keywords: fine grained soil; iron ore waste; mixed soil; carbon emission; physical and chemical properties; enzyme activity

在全球变暖的严峻挑战下,低碳减排是各国面临的紧要任务^[1]。矿区复垦土壤的碳平衡随着客土引入不同数量和质量的土壤有机质,使系统中的碳平衡受到干扰。土壤碳排放实际是土壤与大气中的碳元素循环流动过程,不仅代表土壤质量的高低,还间接反映出土壤中微生物的总体活性^[2]。碳排放不仅与土壤温度、湿度、有效磷、速效钾、pH 等非生物因素有关,而且也受到酶活性,如土壤蔗糖酶、过氧化氢酶等活性的影响^[3]。大规模铁尾矿废石土体重构的施工过程由于机械碾压和扰动,破坏了土壤原始结构和剖面层次,改变了区域土壤的碳循环,进而对全球生态系统的碳平衡产生影响^[4],因此铁矿复垦区的碳排放特征及其驱动因素亟待明确。

我国矿山开采占用、损毁土地约 600 多万 hm²,对矿区进行土地复垦是缓解土地资源紧缺的有效途径^[5-6]。随着土地复垦工作不断进行,在矿区中存在大量由客土和废石混合而成的土,地质与工程上称之为混合土^[4],且混合土能生长植物,初步判断这种混合土可有利于矿山土壤质量提升。在复垦矿区,客土法将富含养分的客土与矿区废石混合用于作物种植,客土引入不同数量与质量的土壤有机质,造成矿区复垦土壤碳循环变化。目前对于碳排放的研究多集中在森林、草原等方面,碳排放作为评价矿区复垦情况的重要质量指标,研究屈指可数^[6-7]。因此,本文以涞源县铁矿废石与客土按不同比例均匀混合的混合土为研究对象,分析不同客土处理对铁矿废石混合土碳排放及其温度敏感性的影响,探讨混合土碳排放与土壤理化性质的变化规律和内在联系,明确客土输入对混合土碳排放及其温度敏感性的影响机制,探究矿区废石混合土碳排放特征及其演变归因,有助于监测矿区复垦土壤碳平衡,并为提高复垦土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验样地位于河北农业大学西校区生态试验场,属华北平原山前地带,中心地理坐标为 38°49′48″N, 115°26′24″E,海拔 22.752 m。试验区属暖温带大陆性季风气候,气候温和,四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨,多年平均气温 13.4 ℃,1 月平均气温-4.3 ℃,7 月平均气温 26.4 ℃,年平均日照时间 2 511.0 h。

本试验在山区自然混合土与植被特征调研的基

础上通过田间试验在 5 年自然修复状态下的铁矿废石混合土上进行长期定位试验,试验地由铁矿废石混合土覆盖,厚度约 50 cm。铁矿废石混合土是由铁矿废石和客土按体积比为 1:1,1:2,1:4,0:1 的比例配合均匀而成,其中铁矿废石取自涞源县白石口联营铜铁矿山,主要由片麻岩碎石组成,碎石粒径 1~35 mm;客土取自河北省满城县,主要由黏土、粉土、粉质黏土和砂混合而成,塑性指数(*I_p*)为 9.8~15.6,主要成分为长石、高岭石、水云母,含少量石英砂粒。每个地块规格 2 m×1 m,共 4 个处理,每个处理 3 次重复,为防止试验处理间相互影响,设置 1 m 的人行走道进行隔离处理。主要生长植物为狗尾草、竹节草、紫花苜蓿、臭椿等自然状态生长的杂草,为保证试验处于自然修复状态,整个试验过程无人为因素影响。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 铁矿废石混合土碳排放和温湿度的测定 每块试验地内设置 1 个内径为 20 cm 圆柱形 PVC 碳排放测室,测室露出混合土表面均 5 cm,同时剪去测室内植物的地上部分,为避免人为因素对混合土碳排放的影响,保持测室在整个碳排放监测时段位置不变,并在碳排放测定结束后采集土壤样品。用 LI-8100 监测铁矿废石混合土的碳排放^[7],用土壤温度计 T-80 和 LI-8100 仪器附带土壤湿度测量元件(EC-5)记录土壤 5 cm 温度和湿度。试验于 2019 年 1—12 月,每个测室重复 3 次;季动态测量分别于春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月),冬季(12 月至翌年 2 月)选取每月中旬晴好天气的一天,8:00—18:00 每 2 h 时测 1 轮;日动态测量时间选择 2019 年 4,7,10,12 月,每月中旬晴好天气的一天,早上 8:00 到次日 6:00,每 2 h 时测 1 轮。

1.2.2 铁矿废石混合土理化性质的测定 土壤样品采集在 2019 年的 4,7,10,12 月,随机采取 3 袋 0—20 cm 土层土样,同时剔除废石和植物根系,风干后过筛保存,用于混合土理化性质的测定。

有效磷:0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾:1 mol/L 醋酸铵浸提火焰光度法测定;全氮:半微量开氏蒸馏法测定(硒粉—硫酸铜—硫酸钾—硫酸硝化);pH:酸度计电位法测定;有机质:硫酸—重铬酸钾容量外加热法 170~180 ℃测定,以上测定方法均参照鲍士旦^[8]的方法。

过氧化氢酶活性:KMnO₄ 滴定法测定,以 1 h 1 g 土壤消耗高锰酸钾体积数(mL/(g·h))表示其活性;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定,以 37℃ 中 1 g 土壤每天释放 P₂O₅ 的质量(mg/(g·d))表示;脲酶:苯酚钠-一次氯酸钠比色法测定,以每天 1 g 土壤中产生铵态氮的质量(mg/(g·d))表示;蔗糖酶:3,5-二硝基水杨酸比色法水杨酸比色法测定,以每天 1 g 土壤中产生葡萄糖质量(mg/(g·d))表示;以上测定方法均参照关松荫^[9]的方法。

1.3 数据处理

所有数据的统计分析采用 Excel 2010、SPSS 17.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 铁矿废石混合土碳排放动态变化特征

2.1.1 铁矿废石混合土碳排放季节动态变化特征

由图 1 可知,铁矿废石混合土的碳排放表现出明显的季节变化特征,夏季(7 月)最高,冬季(1 月)最低;春季混合土碳排放逐渐升高,6 月混合土湿度极低,混合土碳排放也骤然下降,升高到夏季并在 7 月达到最高值,后逐渐下降直至冬季 12 月。T1~T4 处理铁矿废石混合土的年均碳排放速率分别为 1.04,1.48,1.15,3.04 μmol/(m²·s),全年内 T1~T4 处理混合土碳排放变化幅度分别为 0.09~4.19,0.29~4.98,0.11~4.23,0.36~9.83 μmol/(m²·s),T4 较 T1~T3 处理年均碳排放分别高 65.79%,51.32%,62.17%;经方差分析表明,在铁矿废石混合土的碳排放季节动态变化中 T4 处理与 T1~T3 处理差异显著,仅在 7—9 月处理间混合土碳排放差异显著(P<0.05),混合土碳排放表现为 T4>T2>T3>T1。

2.1.2 铁矿废石混合土碳排放日动态变化特征 由图 2 可知,铁矿废石混合土的碳排放有明显的日变化规律,与混合土温度变化特征一致,碳排放最大值出现在 12:00—14:00,T1~T4 处理碳排放最高值分别为 5.41,6.40,4.81,11.95 μmol/(m²·s),最低值出现在凌晨 4:00—6:00,T1~T4 处理碳排放最低值分别为-0.84,-0.40,-0.09,0.39 μmol/(m²·s);T1~T3 处理碳排放日变化幅度较大,铁矿废石混合土碳排放 在 4,7,12 月的晚上和凌晨出现负值,T4 处理碳排放日变化幅度较小,没有出现负值现象,且较 T1~T3 处理碳排放更大;方差分析表明,在铁矿废石混合土的碳排放日动态变化中,T4 处理与 T1~T3 处理差异显著(P<0.05),4 月各处理混合土碳排放差异显著(P<0.05)。

由图 3 可知,铁矿废石混合土年碳排放量随客土

比例增大有逐渐增大趋势,T1、T2 和 T3 处理铁矿废石混合土年碳排放量分别为 398.51,565.33,439.14 g/(m²·a),与 T4(1 157.92 g/(m²·a))相比,年均碳排放量分别降低 65.58%,51.18%,62.08%。方差分析表明,T1、T2 和 T3 处理年均碳排放显著低于 T4 处理(P<0.05),T1、T2 和 T3 处理之间土壤碳排放差异不显著(P>0.05)。

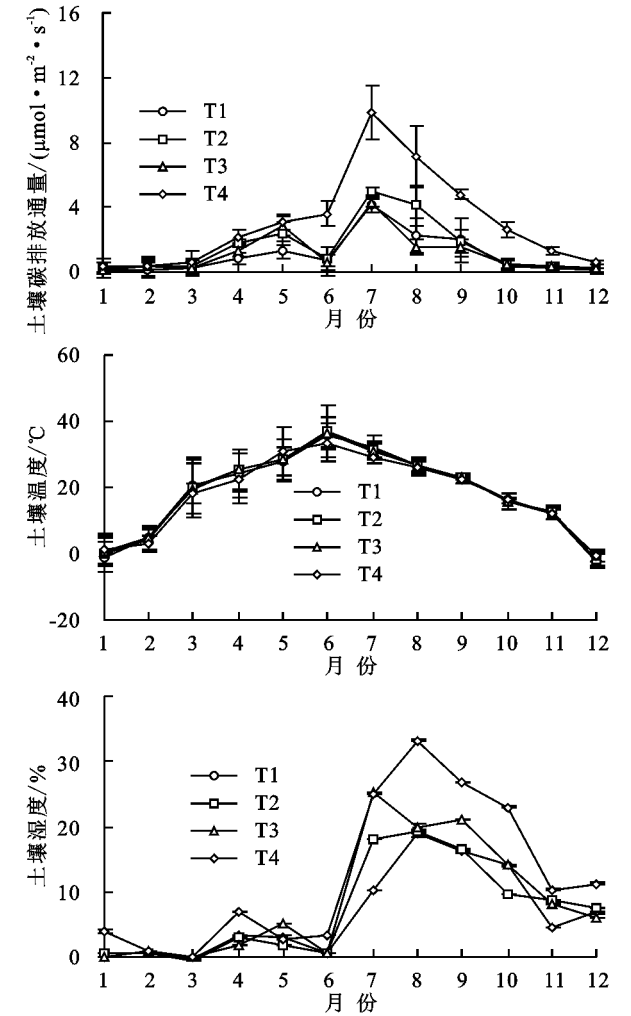


图 1 季尺度铁矿废石混合土碳排放、温度和湿度动态变化特征

2.2 铁矿废石混合土碳排放与土壤水热的关系

2.2.1 铁矿废石混合土碳排放与土壤温度的关系

由表 1 可知,铁矿废石混合土温度变化与气温变化基本一致,表现出明显的日、季动态特征,方差分析表明,不同处理混合土温度季、日尺度均无显著差异(P>0.05)。铁矿废石混合土碳排放与土壤温度有显著指数相关关系(P<0.05),T1~T4 处理混合土碳排放与温度的指数模型差异显著(P<0.05),且指数模型的相关系数 R² 值表现为 T4(0.75)>T3(0.72)>T2(0.65)>T1(0.62)。铁矿废石混合土碳排放敏感系数 Q₁₀ 随客土比例增大逐渐增大,表明客土施入有效增加了铁矿废石混合土碳排放敏感性系数。

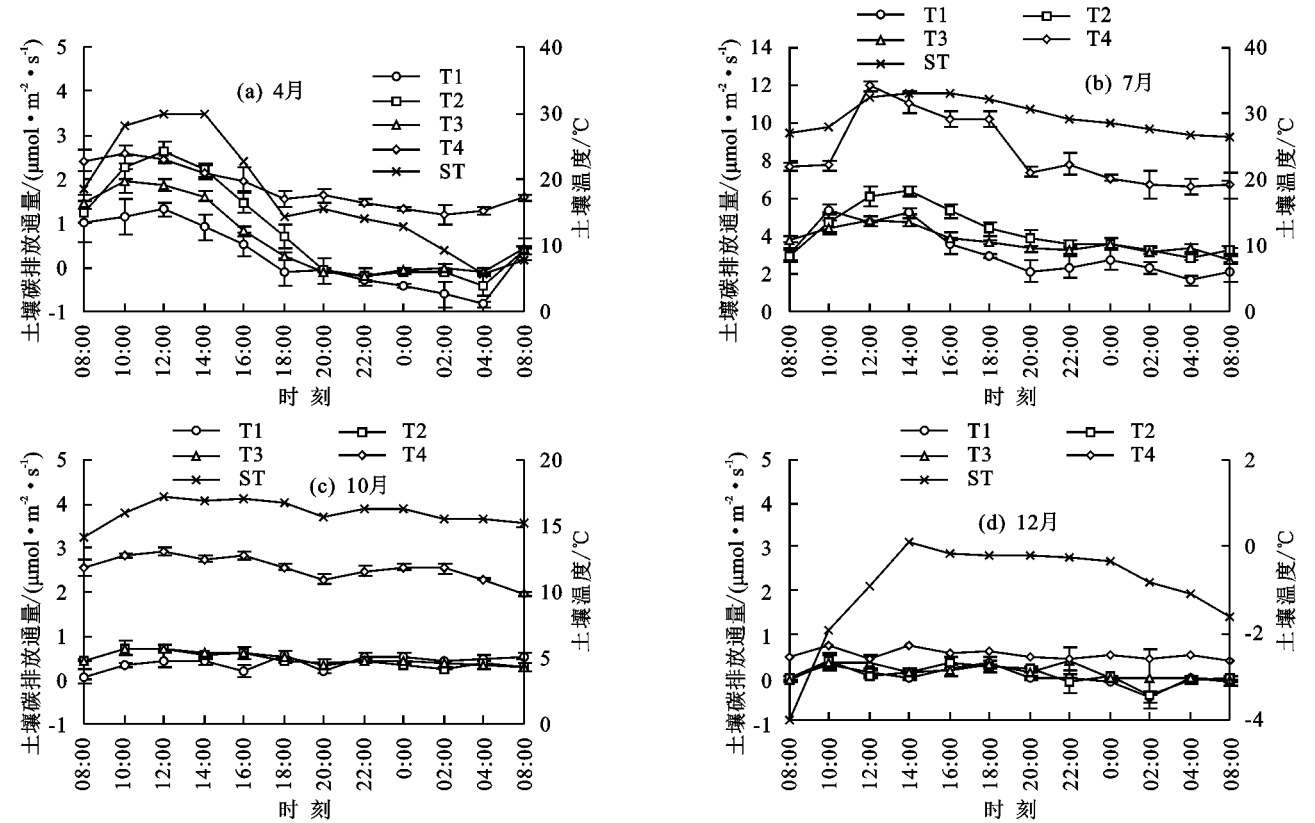


图2 日尺度铁矿废石混合土碳排放、温度动态变化特征

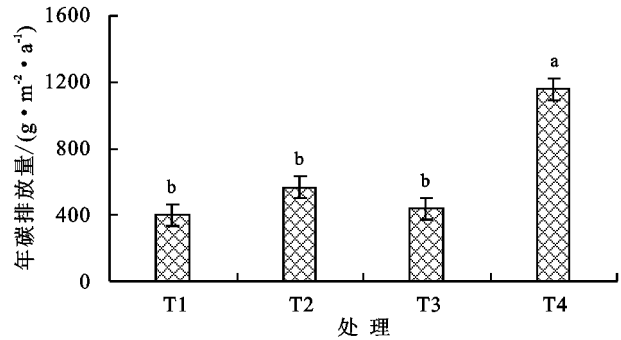


图3 铁矿废石混合土年均碳排放量

2.2.2 铁矿废石混合土碳排放与混合土湿度关系

由表1可知,铁矿废石混合土湿度没有明显季节变化

表1 铁矿废石混合土碳排放(R_s)与土壤温度(T)和土壤湿度(W)关系方程

处理	土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T)			土壤呼吸(R_s)与土壤水分(W)		
	$R_s = a e^{bT}$			$R_s = aW^2 + bW + c$		
T1	$R_s = 0.2158e^{0.0727T}$	$R^2 = 0.62^{**}$	$Q_{10} = 2.07$	$R_s = -58.37W^2 + 20.27W + 0.22$	$R^2 = 0.33^{**}$	
T2	$R_s = 0.167e^{0.0744T}$	$R^2 = 0.65^{**}$	$Q_{10} = 2.10$	$R_s = 197.06W^2 - 20.77W + 0.97$	$R^2 = 0.69^{**}$	
T3	$R_s = 0.1131e^{0.0849T}$	$R^2 = 0.72^{**}$	$Q_{10} = 2.34$	$R_s = 78.85W^2 - 9.80W + 0.80$	$R^2 = 0.50^{**}$	
T4	$R_s = 0.4019e^{0.0861T}$	$R^2 = 0.74^{**}$	$Q_{10} = 2.37$	$R_s = 51.55W^2 + 2.88W + 1.27$	$R^2 = 0.57^{**}$	

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。下同。

2.3 不同客土处理对铁矿废石混合土理化性质的影响

2.3.1 不同客土处理对铁矿废石混合土理化性质的影响

由表2可知,不同客土处理对铁矿废石混合土土壤肥力有不同的影响。与T4处理相比,T1~T3处理有效磷、全氮、有机碳含量随着客土比例的增多

规律,日变化差异较大,观测时段内T1~T4处理混合土湿度变化范围为0.1%~18.8%,0.5%~19.3%,0.1%~35.5%,0.12%~33.17%,T4较T1~T3处理湿度低。方差分析表明,不同处理混合土湿度季、日尺度均无显著差异($P > 0.05$)。铁矿废石混合土碳排放与土壤湿度有显著多项式相关关系($P < 0.05$),T1~T4处理的指数模型差异显著($P < 0.05$),且指数模型的相关系数 R^2 值表现为T2(0.69)>T4(0.57)>T3(0.50)>T1(0.33),不同客土比例下土壤湿度对混合土碳排放影响表现为T4>T2>T3>T1,表明当铁矿废石与客土比例为(1:2)时,铁矿废石混合土碳排放对土壤湿度更为敏感。

呈逐渐上升的趋势,T1~T3处理较T4处理最大减幅分别为79.01%,60.19%,55.60%;混合土pH随客土比例增多呈逐渐降低的趋势,T1~T3处理较T4处理最大减幅为5.03%。从不同的测定时期来看,铁矿废石混合土有效磷和速效钾含量整体呈先上升再

下降的单峰曲线;pH 呈逐渐下降趋势;T1、T4 处理混合土有机碳含量全年变化幅度不明显,T2 处理有机碳含量在春季达到最大值,T3 处理有机碳含量在冬季达到最大值;全氮含量差异不大。

表 2 不同客土比例铁矿废石混合土肥力变化特征

月份	处理	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	pH	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	碳氮比
4	T1	5.51±0.75b	82.11±1.43b	8.49±0.07a	0.63±0.02b	9.00±0.90c	14.26±0.98a
	T2	3.25±0.71c	89.47±0.53b	8.40±0.02b	0.62±0.09b	9.65±0.34c	15.56±0.91ab
	T3	4.64±0.77bc	98.77±0.61ab	8.37±0.02b	0.54±0.04b	6.21±0.16b	11.47±1.64ab
	T4	10.22±0.65a	121.43±0.49a	8.06±0.08c	1.21±0.13a	14.92±0.14a	12.35±0.84c
7	T1	2.19±0.90b	106.19±1.39c	8.39±0.04a	0.69±0.12b	7.91±1.08b	11.44±1.88a
	T2	7.23±0.15b	138.17±1.08a	8.36±0.09a	0.63±0.06b	7.69±1.50b	12.30±1.24ab
	T3	13.08±0.90b	116.19±1.31ab	8.33±0.07a	0.87±0.10b	9.07±0.42b	10.42±1.22ab
	T4	14.62±0.05a	129.57±1.11ab	8.18±0.02a	1.92±0.02a	17.32±0.05a	9.00±0.12b
10	T1	3.45±0.14b	113.75±1.49a	8.37±0.03a	0.70±0.22b	7.17±0.59c	10.23±0.47a
	T2	4.58±0.41b	122.34±0.92a	8.34±0.03a	0.79±0.09b	7.88±0.43b	10.00±0.65a
	T3	8.36±0.14b	120.26±1.04a	8.23±0.05b	1.29±0.07a	10.47±0.53b	8.10±2.09a
	T4	16.44±0.13a	114.12±0.16a	8.13±0.02c	1.76±0.15a	12.77±0.55a	7.25±0.93a
12	T1	3.85±0.29b	75.89±1.55bc	8.36±0.07a	0.58±0.01b	8.86±0.47b	15.21±0.47a
	T2	3.65±0.34b	87.28±1.51ab	8.30±0.04b	0.50±0.06b	6.63±0.24b	13.34±1.20b
	T3	5.24±0.59b	85.89±0.21ab	8.23±0.04b	0.89±0.07ab	11.29±0.98b	12.73±1.27ab
	T4	9.56±1.18a	96.55±1.65a	8.05±0.07c	1.20±0.10a	16.51±1.31a	13.80±0.44c

注:表中数据表示测定指标平均值±标准差;同列不同小写字母表示相同月份不同处理间显著性差异($P<0.05$)。

2.3.2 不同客土处理对铁矿废石混合土酶活性的影响 由图 4 可知,铁矿废石混合土的过氧化氢酶活性春季到夏季逐渐增强,不同处理酶活性在 7 月到达最高值,秋季到冬季混合土酶活性逐渐降低;T1~T4 处理混合土过氧化氢酶活性年均值分别为 0.35, 0.42,0.43,0.49 mL/(g · h);方差分析表明,T4 处理与 T1~T3 处理混合土过氧化氢酶活性仅在 4,7 月差异性显著($P<0.05$)。与土壤温度变化趋势一致,铁矿废石混合土碱性磷酸酶活性呈单峰曲线;T1~T4 处理铁矿废石混合土的碱性磷酸酶活性年均值分别为 3.98,3.87,4.36,5.05 mg/(g · d),随客土比例增大酶活性有逐渐增强的趋势;方差分析表明,不同处理混合土碱性磷酸酶活性差异性不显著($P>0.05$)。T1~T3 处理铁矿废石混合土脲酶活性(0.70~1.95 mg/(g · d))显著小于 T4 处理(4.07~4.90 mg/(g · d)),经方差分析表明,T1~T3 处理之间混合土脲酶活性差异性不显著($P>0.05$),与 T4 处理差异性极显著($P<0.01$)。铁矿废石混合土的蔗糖酶活性 T1~T4 处理年均值分别为 0.80,1.02,1.03,1.62 mg/(g · d),混合土蔗糖酶活性在春季最低,夏季最高;经方差分析表明,T4 与 T1、T2、T3 处理混合土蔗糖酶活性差异性显著($P<0.05$),T1、T2、T3 处理之间差异性不显著($P>0.05$)。

2.4 铁矿废石混合土碳排放与理化性质的关系

由铁矿废石混合土的碳排放与环境因子间相关性分析(表 3)可知,混合土碳排放与温湿度、速效钾含量、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性呈极显著相关关系($P<0.01$),与 pH 呈显著负相关关系($P<0.05$);铁矿废石混合土的温湿度、化学性质和酶活性的变异存在着相互影响,相关分析表明,混合土温度与湿度、速效钾含量和过氧化氢酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性存在相关关系;除有机碳和碳氮比外,混合土湿度与土壤化学性质和酶活性呈极显著相关关系($P<0.01$);混合土 pH 与温湿度、化学性质和酶活性呈负相关关系;过氧化氢酶活性与碱性磷酸酶活性、有效磷、速效钾和全氮含量呈极显著相关关系($P<0.01$);脲酶与混合土化学性质均呈极显著相关关系($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 不同客土处理对铁矿废石混合土碳排放动态变化的影响

本研究发现,温度对土壤碳排放贡献率最大,铁矿废石混合土的碳排放随温度变化表现出很强的日、季节变化规律,与陈晓鹏等^[10]的研究结果一致。马志良等^[11]和李贤红^[12]研究表明,在低温和盐碱土下土壤碳排放出现负值情况;本文研究结果显示,在春、秋和冬季凌晨及夜晚碳排放出现负值情况;出现的原

因可能是低温有利于土壤对 CO₂ 的吸收^[11],在土壤温度较低的情况下,土壤中酶活性减弱,植物根系、微生物呼吸作用较弱;土壤温度由高转低,在地表及植物上产生露珠,这些小水滴本身对 CO₂ 有一定的吸附能力^[12],在混合土温度较低的时候,低温吸收的 CO₂ 以及温差形成的水滴对 CO₂ 的吸收量大于混合土产

生 CO₂ 量时,混合土碳排放出现负值。T4 处理的碳排放显著高于 T1~T3 处理,整体随客土比例越大,混合土碳排放逐渐增强,这与周际海等^[13]的研究结果一致,添加外源碳增强土壤碳排放,是因为添加客土为铁矿废石提供了大量碳源,极大地提高了混合土肥力,促进动植物的呼吸作用,碳排放也逐渐增强。

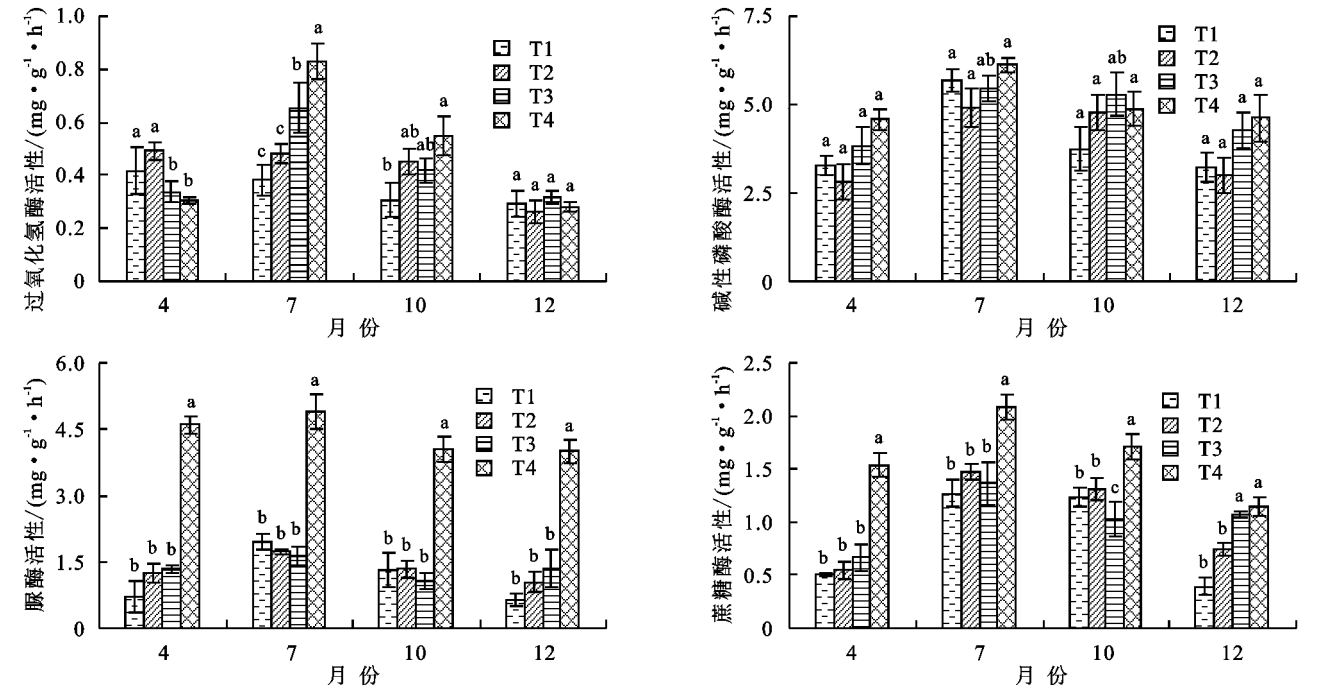


图 4 不同客土处理铁矿废石混合土酶活性变化特征

表 3 铁矿废石混合土的土壤影响因子相关矩阵

指标	碳排放	温度	湿度	AP	AK	TN	pH	SOC	CAT	ALP	URE	INV
碳排放	1.000											
温度	0.812 **	1.000										
湿度	0.785 **	0.575 **	1.000									
AP	0.144	0.130	0.289 *	1.000								
AK	0.583 **	0.598 **	0.719 **	0.332 *	1.000							
TN	0.128	0.089	0.344 *	0.697 **	0.353 *	1.000						
pH	-0.312 *	-0.082	-0.435 **	-0.564 **	-0.368 *	-0.507 **	1.000					
SOC	0.108	-0.061	0.200	0.641 **	0.178	0.734 **	-0.560 **	1.000				
CAT	0.598 **	0.622 **	0.499 **	0.296 *	0.414 **	0.393 **	-0.113	0.295 *	1.000			
ALP	0.467 **	0.366 *	0.518 **	0.381 **	0.431 **	0.309 *	-0.283	0.181	0.244	1.000		
URE	0.251	0.090	0.316 *	0.765 **	0.355 *	0.667 **	-0.641 **	0.776 **	0.220	0.315 *	1.000	
INV	-0.272	-0.191	-0.443 **	0.224	-0.231	0.083	-0.029	0.168	-0.129	0.110	0.187	1.000

注:AP 为有效磷;AK 为速效钾;TN 为全氮;SOC 为有机碳;CAT 为过氧化氢酶;ALP 为碱性磷酸酶;URE 为脲酶;INV 为蔗糖酶;* * 表示相关性分析达到 $P<0.01$ 极显著水平;* 表示相关性分析达到 $P<0.05$ 显著相关。

3.2 不同客土处理对铁矿废石混合土碳排放与水热的关系

张东秋等^[14]研究表明,土壤温度和湿度是影响碳排放的主要因子,采用指数模型^[15]模拟土壤碳排放与土壤温度关系较好,本研究也有同样发现。铁矿废石混合土碳排放与温度拟合指数模型均达到显著

水平($P<0.05$),指数模型的决定系数 $T4(0.75)>T3(0.72)>T2(0.65)>T1(0.62)$ 。温度敏感系数(Q_{10})是反映土壤碳排放对土壤温度敏感性的重要指标,陆地生态系统的 Q_{10} 为 1.3~5.6^[14],本研究中 Q_{10} 随客土比例增大逐渐增大(2.07~2.37),表明客土施入有效增加了铁矿废石混合土碳排放敏感性系数,目

前有关添加客土对铁矿废石混合土碳排放温度敏感性系数 Q_{10} 值的研究并未形成统一的结论,还存在诸多不确定性。本研究采用多项式模拟混合土碳排放与土壤湿度的关系,结果表明,铁矿废石混合土碳排放与土壤湿度模型相关系数 R^2 均达到显著水平 ($P < 0.05$),湿度对混合土碳排放影响表现为 $T_2 > T_4 > T_3 > T_1$,表明当铁矿废石与客土比例为 (1:2) 时,铁矿废石混合土碳排放对混合土湿度更为敏感。是因为混合土中植物生长受土壤湿度影响较大,当根系生长活动发生改变,土壤中的微生物活性受影响,种类和数量也有变化,对混合土的碳排放产生显著影响,与葛晓改等^[16] 研究结果一致。

3.3 不同客土处理对铁矿废石混合土理化性质的影响

不同客土处理下,混合土的理化性质略有差异。张东秋等^[14] 研究表明,土壤的环境因子对碳排放有重要影响,随着耕作年限的增加,表层土壤里的速效钾含量变化不大,维持了较高的含量水平,本研究中也发现, T_4 处理混合土速效钾、全氮含量显著高于 $T_1 \sim T_3$ 处理,但不同处理之间混合土速效钾、全氮含量差异不明显;梁国鹏^[17] 研究表明,土壤 pH 对有效磷含量的影响很大,碱性土 pH 越高,有效磷含量越低,本研究发现同样的规律,铁矿废石混合土 pH 越高,有效磷含量越低。铁矿废石混合土的有效磷含量有夏秋季高于春冬季;整体有 T_4 处理混合土有效磷含量高于 $T_1 \sim T_3$ 处理。夏秋季混合土的温度相对春冬季较高,微生物活跃,磷、氮素转换快,所以混合土有效磷含量夏秋季高于春冬季。

土壤酶活性在 C、N 循环中起着非常重要的作用^[18],土壤中酶活性增强或减弱时,土壤中生物代谢水平发生变化,从而表现出混合土碳排放的增减^[15]。熊亚等^[19] 研究表明,在矿区土壤中,土壤酶活性以及土壤环境,随着重金属污染程度的加剧而降低;本研究中,随着客土比例增加,酶活性有逐渐增强的趋势,这种现象在夏季更明显,夏季混合土过氧化氢酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性 T_4 处理较 $T_1 \sim T_3$ 处理分别高 21.69~54.22%, 7.18~33.93%, 27.27~34.93%, 57.70~64.43%, 归因为土地复垦改变了原来土壤的理化性质,土壤中酶的种类及数量也会发生不同程度的改变;已有研究^[18] 发现,升高土壤温度,土壤酶活性增强,碳排放提高。本研究中,铁矿废石混合土的过氧化氢酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶春季到夏季酶活性逐渐增强,不同处理酶活性在 7 月达到最高值,夏季到秋季酶活性随混合土温度降低逐渐减弱,过氧化氢酶活性在冬季达到最低值,碱性磷酸酶、蔗

糖酶在春季活性最弱。

3.4 铁矿废石混合土碳排放与理化性质的关系

本研究采用 Pearson 相关分析,得出铁矿废石混合土碳排放与温度、湿度极显著相关 ($P < 0.01$),相关性高达 0.812 和 0.785,混合土碳排放在日尺度和季节尺度上的动态变化与温度整体一致;混合土碳排放的主要碳源及基础是有机碳含量,有机碳含量与碳排放成正比,是因为随着有机碳含量的增加,微生物变得活跃,碳排放越强烈^[12];。当土壤 $pH < 7$ 时, CO_2 的产生量随 pH 的增加而增加, $pH > 7$ 时, CO_2 的产生量随 pH 的增加而降低^[13];本研究中, $T_1 \sim T_4$ 处理 pH 分别为 8.40, 8.35, 8.29, 8.11,碳排放年均值分别为 1.04, 1.48, 1.15, 3.04 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$, pH 调控混合土的化学反应,对碳排放有明显的影 响,与 前人^[13] 研究结果一致。胡伟等^[15] 研究表明,全氮含量可以在总体上反映出混合土的供氮能力,本研究中混合土中的全氮含量与碳排放关系密切,含氮化合物通过微生物分解、化学作用到植物吸收循环等,混合土氮素含量越大,碳排放量有增强的趋势。

熊亚等^[19] 对受重金属污染的矿区土壤监测发现,复垦土壤的过氧化氢酶与脲酶等极显著相关。因此,可以用酶活性来表示土壤肥力大小、质量高低及复垦区受重金属污染程度等。本研究中混合土碱性磷酸酶与脲酶活性显著相关,且酶活性与混合土 pH、全氮含量都有较高相关关系。铁矿废石混合土碳排放与过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性都有显著相关关系;过氧化氢酶、脲酶活性与有机碳含量都有显著相关关系 ($P < 0.05$)。

4 结论

(1)随客土比例增大铁矿废石混合土碳排放有逐渐增强的趋势, T_4 处理年均碳排放量 (1 157.92 $g/(m^2 \cdot a)$) 比 $T_1 \sim T_3$ 处理分别高 65.58%, 51.18%, 62.08%。混合土碳排放与土壤温度变化趋势一致,日尺度下碳排放最大值出现在中午 (12:00—14:00),最低值出现在凌晨 (4:00—6:00);季尺度下,混合土的碳排放在夏季 (7 月) 最高,冬季 (1 月) 最低,当混合土温度较低时,碳排放出现负值现象。

(2)铁矿废石混合土碳排放与土壤温度拟合指数模型均达到显著水平 ($P < 0.05$),客土比例增大显著提高铁矿废石混合土碳排放敏感性系数 Q_{10} ,采用多项式 ($R_s = aW^2 + bW + cR_s$),能较好地拟合混合土碳排放与土壤湿度的关系。

(3)客土比例增大,有效磷含量增多,过氧化氢酶活性增强, pH 降低; T_4 处理比 $T_1 \sim T_3$ 处理有机碳、全氮

含量显著提高,脲酶、蔗糖酶活性显著增强($P<0.05$)。

(4)铁矿废石混合土碳排放除受土壤温度和湿度的影响外,混合土有机碳含量和蔗糖酶活性等土壤理化性质对其也有重要影响。

参考文献:

[1] 马志良,赵文强,刘美,等.土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展[J].应用生态学报,2018,29(10):321-330.

[2] 杜锟,李发东,涂纯,等.模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(4):35-43.

[3] 郭义强,邸文聚,黄妮,等.土地整理工程对土壤碳排放的影响[J].土壤通报,2016,47(1):36-41.

[4] 杨天戈.唐县土地整治项目区土壤碳排放变化特征及影响因素研究[D].河北 保定:河北农业大学,2018.

[5] 卞正富.国内外煤矿区土地复垦研究综述[J].中国土地科学,2000,14(1):6-11.

[6] 陈耀明.山西采煤塌陷地的复垦途径探讨[J].能源环境保护,1996,10(5):33-35.

[7] 耿绍波,饶良懿,鲁绍伟,等.国内应用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测量土壤呼吸研究进展[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(3):309-316.

[8] 鲍士旦.土壤农化分析.[M].北京:中国农业出版社,2000:32-146.

[9] 关松萌.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:260-360.

(上接第 345 页)

[19] Hu S J, Zhang D, Yang N Y, et al. Effects of the chemical structure, surface, and micropore properties of activated and oxidized black carbon on the sorption and desorption of phenanthrene[J].Environmental Science and Technology,2019,53(13):7683-7693.

[20] Jin J, Sun K, Wang Z Y, et al. Effects of chemical oxidation on phenanthrene sorption by grass- and manure-derived biochars [J].Science of the Total Environment,2017,598:789-796.

[21] Liu G C, Zheng H, Zhai X W, et al. Characteristics and mechanisms of microcystin-LR adsorption by giant reed-derived biochars: Role of minerals, pores, and functional groups[J].Journal of Cleaner Production, 2018,176:463-473.

[22] Wang Z Y, Han L F, Sun K, et al. Sorption of four

[10] 陈晓鹏,王根绪,孙菊英,等.增温和氮添加对长江源区高寒沼泽草甸生态系统呼吸的影响[J].草地学报, 2020,28(1):196-202.

[11] 马志良,赵文强,刘美,等.高寒灌丛生长季土壤转化酶与脲酶活性对增温和植物去除的响应[J].应用生态学报,2018,29(7):2211-2216.

[12] 李贤红.滨海盐碱地垦殖土壤呼吸特征及其影响因子研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2018.

[13] 周际海,陈晏敏,袁颖红,等.秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异[J].水土保持学报,2019, 33(4):248-254.

[14] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(7):778-785.

[15] 胡伟,张亚红,李鹏,等.不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响[J].环境科学,2019, 40(6):2858-2868.

[16] 葛晓改,童冉,曹永慧,等.模拟干旱下凋落物输入对毛竹林土壤呼吸及温度敏感性的影响[J].应用生态学报,2018,29(7):2233-2242.

[17] 梁国鹏.施氮水平下土壤呼吸及土壤生化性质的季节性变化[D].北京:中国农业科学院,2016.

[18] 何伟静,江洪,原焕英.土壤呼吸的酶促作用研究[J].安徽农业科学,2010,38(27):14983-14985.

[19] 熊亚,莫彩莲,刘园.攀枝花尾矿土壤微生物数量及土壤酶活性分析[J].广州化工,2017,45(10):132-135.

hydrophobic organic contaminants by biochars derived from maize straw, wood dust and swine manure at different pyrolytic temperatures[J].Chemosphere,2016, 144:285-291.

[23] 顾博文,曹心德,赵玲,等.生物质内源矿物对热解过程及生物炭稳定性的影响[J].农业环境科学学报,2017, 36(3):591-597.

[24] Sun Y K, Takahashi K, Hosokawa T, et al. Diethyl phthalate enhances apoptosis induced by serum deprivation in PC12 cells[J].Basic and Clinical and Pharmacology,2012,111:113-119.

[25] Abdul G, Zhu X Y, Chen B L. Structural characteristics of biochar-graphene nanosheet composites and their adsorption performance for phthalic acid esters [J].Chemical Engineering Journal,2017,319:9-20.