生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之，姜瑢，王国庆，陈玉东，龙涛，林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2022年2月
第43卷 第 2 期
Vol.43 No.2

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 2 期
2022 年 2 月 15 日

目　次

综述
不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 …… 李勖之, 姜瑢, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁(577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 …… 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国(586)
研究报告
兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 …… 黄文, 王胜利(597)
基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 …… 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂(608)
华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 …… 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铖, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽(619)
淄博 2021 年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 …… 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文(629)
浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 …… 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲(639)
2001 ~ 2019 年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 …… 潘晨, 康志明(649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 …… 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军(663)
2015 ~ 2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 …… 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤(675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 …… 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜(686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 … 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源(696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 …… 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯(707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 …… 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发(714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 …… 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤(723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 …… 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜(735)
2000 ~ 2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 …… 田智慧, 任祖光, 魏海涛(743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 …… 徐森, 李思亮, 钟君(752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 …… 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏(762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 …… 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送(770)
雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 …… 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮(782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 …… 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌(795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 …… 郭芝芝, 苏振华, 邸琰茗, 郭逍宇(803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 …… 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰(813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 …… 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊(826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 …… 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强(837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 …… 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华,丁明军, 鞠民, 刘赟(847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 …… 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华(859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 …… 王子峤, 李叙勇(867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 …… 张坤锋, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨(878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 …… 齐鹏, 胡春, 邢学辞, 毕志浩, 李泽松(887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 …… 柴铖, 许路, 金鑫, 石烜, 吴晨曦, 金鹏康(896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 …… 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升(907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 …… 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮亮, 文言, 钱飞跃(920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 …… 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞(928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 …… 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波(936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 …… 张丁, 黄容, 高雪松(946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 …… 鞠铁男, 雷梅(957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 …… 穆德苗, 孙约兵(965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 …… 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰(975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 …… 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬(985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 …… 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋(995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 …… 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚(1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全生产的影响 …… 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵(1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 …… 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲(1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 …… 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉(1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 …… 杨文娜, 余泺, 罗东海, 熊子怡, 王蓥燕, 王子芳, 高明(1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 …… 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 许淼平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉(1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 …… 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲(1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 …… 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣(1069)
模拟及实际根系分泌物对芘污染土壤微生物群落的影响 …… 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗(1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 …… 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君(1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 …… 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲炜, 龙小翠(1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 …… 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗(1108)
《环境科学》征订启事(618)　《环境科学》征稿简则(761)　信息(685, 935, 956)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第2期 2022年2月
Vol.43,No.2 Feb.,2022

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系

李文杰[1,2], 张祯皎[1,2], 赵雅萍[1,2], 许淼平[1,2], 任成杰[1,2], 杨改河[1,2], 冯永忠[1,2], 任广鑫[1,2], 王晓娇[1,2], 韩新辉[1,2]*

(1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 为揭示黄土高原人工刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶活性的变化特征及与碳组分的响应关系,研究该区域不同恢复年限刺槐林土壤碳库组分、碳降解酶活性、微生物呼吸及其熵值的特征,探讨土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系. 结果表明,微生物呼吸(MR)随刺槐林龄增加呈先增加后减小趋势,微生物代谢熵(qCO_2)随刺槐林龄增加而显著下降,微生物熵(qMB)则相反; 土壤碳降解酶在恢复初期显著增加,但在恢复后期氧化酶(酚氧化酶 PO + 过氧化物酶 PER)和纤维二糖水解酶(CBH)活性均有不同程度地降低. 土壤有机碳和惰性有机碳含量随刺槐林龄增加显著增加,活性有机碳无显著差异. 相关性分析和偏最小二乘路径模型表明,土壤碳降解酶、碳库组分同微生物呼吸及其熵值(qCO_2 和 qMB)存在着显著相关关系,水解酶(BG + CBH)与土壤有机碳、微生物量碳、微生物熵、惰性和活性有机碳呈极显著正相关,氧化酶(PO + PER)与黏粒和微生物呼吸显著正相关; 惰性有机碳是植被恢复影响土壤微生物代谢的关键环节. 综上所述,人工刺槐林生态系统会随恢复年限的增加逐渐稳定,并对土壤的碳汇具有积极的正效应. 结果将有助于深入了解脆弱生境区域土壤碳库转化规律及调控机制,以期为黄土高原植被恢复和经营管理提供科学依据.

关键词:人工刺槐林; 碳降解酶; 碳库组分; 微生物呼吸; 微生物熵值; 偏最小二乘路径模型(PLS-PM)

中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)02-1050-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202107008

Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of *Robinia pseudoacacia*

LI Wen-jie[1,2], ZHANG Zhen-jiao[1,2], ZHAO Ya-ping[1,2], XU Miao-ping[1,2], REN Cheng-jie[1,2], YANG Gai-he[1,2], FENG Yong-zhong[1,2], REN Guang-xin[1,2], WANG Xiao-jiao[1,2], HAN Xin-hui[1,2]*

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: To reveal the change in the characteristics of soil microbial C-degrading enzyme activities and the response to the components of C during the restoration process of *Robinia pseudoacacia* forests in the Loess Plateau, the components of the soil C pool, C-degrading enzyme activities, and microbial metabolic entropy of *R. pseudoacacia* in different restoration stages were studied, and the response relationship between C-degrading enzymes and soil C components was explored. The results showed that the microbial respiration (MR) first increased and then decreased with the restored years. We found that the microbial metabolic entropy (qCO_2) decreased significantly with the restored years, but the microbial entropy (qMB) increased. Soil C-degrading enzymes increased significantly in the early-stage restoration of *R. pseudoacacia*; however, oxidizing enzymes (PO and PER) and cellobiohydrolase (CBH) decreased in the late stage of restoration. The soil organic C and recalcitrant organic C increased significantly with the restored years; however, there was no significant difference for the labile organic C. Correlation analysis and the partial least squares-path model (PLS-PM) showed that soil C-degrading enzymes and C components were significantly correlated with microbial respiration and entropy (qCO_2 and qMB), respectively. The hydrolytic enzyme (BG + CBH) was significantly positively correlated with SOC, microbial biomass C, qMB, and recalcitrant and labile organic C. The oxidizing enzyme (PO + PER) was significantly positively correlated with the soil clay and qCO_2. In addition, the recalcitrant organic C was the key driver of soil microbial metabolism affected by vegetation restoration. Overall, the ecosystem of *R. pseudoacacia* plantations would gradually stabilize with the increase in restored years and significantly increase the sequestration effect of soil C. These results will be helpful to understand the transformation rule and regulation mechanism of the soil C pool in vulnerable habitats and provide scientific basis for the restoration and management of vegetation in the Loess Plateau.

Key words: *Robinia pseudoacacia* plantations; carbon-degrading enzyme; carbon pool components; microbial respiration; microbial entropy; partial least squares-path model (PLS-PM)

陆地生态系统的碳库主要存在于大气、植被和土壤中,其中土壤碳库是植被和大气碳库总和的两倍[1,2],直接影响大气中 CO_2 的浓度[3]. 近年来土壤有机碳库的研究受到了高度关注. 根据有机碳分解的难易程度及周转速率,可以将土壤有机碳库分为活性和惰性有机碳库[4]. 土壤微生物对活性和惰性有机碳的降解能力会直接影响到土壤有机碳的累积与稳定性[5,6],同时微生物分泌的酶在这过程中扮演着重要角色. 因此,土壤微生物-土壤酶-碳库之间复杂的关系直接影响整个陆地生态系统.

土壤有机碳主要来源于植物残体和根系分泌

收稿日期: 2021-07-01; **修订日期**: 2021-07-21
基金项目: 国家林业和草原局林草科技创新发展与研究项目(2020132111); 国家自然科学基金项目(41877543)
作者简介: 李文杰(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为资源与环境生态学, E-mail:18238632667@163.com
* 通信作者,E-mail:hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

物,其主要的化学组分有糖类、蛋白质、半纤维素、纤维素、木质素和脂类等[7,8]. 土壤中的活性有机碳易被微生物利用并分解[9],而它的分解也会释放出一定量的 CO_2[10]. 有研究表明,土壤酶和微生物作用参与的生物化学过程使得土壤有机碳形态不断转化是导致土壤碳库及功能改变的关键因素[11]. 微生物分泌的胞外酶促进土壤有机碳矿化分解,其中水解酶主要分解如糖类、淀粉和纤维素等物质,包括 β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)和纤维二糖水解酶(CBH)等; 氧化酶主要参与惰性有机碳氮组分(如木质素)氧化分解和土壤腐殖化等过程,包括酚氧化酶(PO)和过氧化物酶(PER)等[12]. 因此,酶活性的高低可表征土壤微生物养分需求以及与养分供给水平之间的关系. 有研究表明,土壤酶活性的动态变化与土壤有机碳存在显著正相关关系[13],同时发现土壤转化酶与微生物量碳和可溶性有机碳显著相关,与碳矿化速率趋势具有一致性[10]. 此外,土壤酶活性与植被特征、土壤温湿度和 pH 等因素有关[14,15],以上研究结果说明酶活性与生物和非生物因素的复杂性有关. 虽然土壤胞外酶活性与碳库组分含量间的关系已被广泛关注,但是土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的响应关系仍不明确.

黄土高原自实施“退耕还林”工程以来生态恢复和水土保持的效应较好,刺槐因其树种特性成为该地区的主栽树种. 人工刺槐林演替过程中,其类型和生境条件发生动态变化,势必会影响森林生态系统碳库组分和酶活性的变化. 目前,研究者们对人工刺槐林恢复阶段土壤碳库储量变化和酶活性变化特征进行了大量的研究,但对于刺槐林恢复阶段土壤中碳库组分及其相关碳降解酶的关系仍然了解不足,限制了黄土高原退耕还林生态恢复与保护对土壤肥力演变及酶活性的影响机制的认识. 为此,本研究采用空间代替时间的方法,选取不同演替阶段的人工刺槐林作为对象,从土壤微生物碳降解酶及相关碳库组分的角度分析恢复阶段微生物碳降解相关酶活性及与土壤碳库转化状况的关系,结果将有助于深入了解脆弱生境区域土壤碳库转化规律及调控机制,以期为黄土高原植被恢复和未来经营管理提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究选择陕西省延安市安塞区五里湾(109°19′~109°22′E, 36°51′~36°53′N)为研究区域,平均海拔1 371.9 m. 该地区属暖温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 8.8℃,年均降雨量为 505.3 mm,降雨多集中于 7~9 月,该流域属黄土丘陵沟壑区,土壤类型主要为黄绵土(Calcaric Cambisols, FAO-UNESCO),土质疏松,抗蚀力差,属最具代表性的黄土侵蚀区之一. 在退耕前,该地区主要种植的作物是玉米,退耕后,该地区种植大面积刺槐,并采取自然经营,未经间伐抚育. 刺槐林下植被主要有异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、苔草(*Carex tristachya*)、碱菀(*Tripolium pannonicum*)和野菊(*Dendranthema indicum*)等.

1.2　样地选择和采样

本试验于 2019 年 8 月开展,试验选取立地条件相似和干扰程度较低的土地,分别种植 14、20、30 和 45 a 的刺槐林(编号为 RP14、RP20、RP30 和 RP45,林龄通过当地林业部门造林记录和使用生长锥获取的林木生长数据确定进行研究),各年限刺槐林在造林前均为耕地,主要种植作物为玉米(*Zea mays*); 并以农田(FL)作为对照. 样地基本特征信息见表 1. 在每个年限刺槐林选择 3 块立地条件相近的重复样地,使用 GIS 和坡度仪等仪器进行样地坡向、坡度和海拔的测量并记录; 每个样地内设置大小为 20 m×20 m 的标准样方,随机选取样方内 15~20 棵树,通过每木检尺法测量不同林龄刺槐的树高和胸径; 并且在样方内随机设置 6 个 1 m×1 m 的小样方,通过目测法计算林下植被覆盖度; 同时将样方内按“S”形采样法选取 10 个采样点,去除表面枯落物和植物残体后,用土钻(直径为 5 cm)采集距离树干 1 m 以外的 0~10 cm 土壤,将同一样方内 5 个样点的土样混匀过 2 mm 土筛后分成两份,一份

表 1　样地基本特征信息[1)]

Table 1　Basics feature information of the sample site

项目	坡向/(°)	坡度/(°)	海拔/m	树高/m	胸径/cm	植被覆盖度/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/g·cm^{-3}
FL	北偏西 13	0	1 270	NA	NA	—	14.59±0.41b	43.74±0.09b	41.67±0.33a	1.28±0.03a
RP14	北偏西 27	30	1 295	8.17	10.50	33.00	19.16±0.35a	48.47±0.87a	32.37±0.99c	1.21±0.04a
RP20	北偏东 47	30	1 314	9.83	13.97	32.87	18.43±0.66a	42.75±1.52bc	38.82±0.85b	1.10±0.11a
RP30	北偏西 33	40	1 273	11.50	16.90	40.93	18.60±0.36a	41.23±0.80bc	40.17±0.48ab	1.16±0.05a
RP45	北偏东 64	30	1 307	13.50	20.50	87.87	18.15±0.68a	40.64±0.28c	41.20±0.52a	1.06±0.06a

1)NA 表示不适用; “—”表示采样时农田作物已收获,该指标未测定; 数据为平均值±标准误,不同小写字母表示不同林龄刺槐林之间的差异($P<0.05$),下同

在 -20℃冷藏保存用于测定微生物生物量养分和酶活性；一份在阴凉处风干保存用于测定土壤养分.

1.3 土壤理化性质的测定

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热容量法测定[16]；微生物量碳(MBC)氯仿熏蒸培养-K_2SO_4 浸提,TOC 仪测定；土壤惰性有机碳采用浓度为 6 mol·L^{-1} HCl 酸水解法[17],并用重铬酸钾-浓硫酸外加热容量法测定碳含量；采用环刀法(100 cm^3)测定土壤容重. 称取 5 g 土壤样品加入 100 mL 0.5 mol·L^{-1} 的$(NaPO_3)_6$溶液中,置于 180 r·min^{-1} 旋转式摇床上(25℃)持续振荡 6 h,通过 Malvern MS 2000 激光粒度仪(Malvern Instruments,英国)测定土壤黏粒(clay, <2 μm)、粉粒(silt, 2 ~ 50 μm)和砂粒(sand, 50 ~ 2 000 μm)的质量分数.

1.4 土壤微生物呼吸和酶活性的测定

土壤微生物呼吸即土壤基础呼吸的测定采用碱液吸收法[18]. 具体操作:将不同年限刺槐林土壤分别在(25 ± 0.5)℃下预培养 7 d[19]. 在进行培养试验之前,将 20 g 鲜土和 5 mg 石英砂(防止土壤压实)放入一个 50 mL 的管中,将含水量调整到土壤持水量的 60%. 二氧化碳的吸收装置(装有 20 mL 2 mol·L^{-1} NaOH 的 50 mL 离心管)、去离子水(装有 20 mL 去离子水的 50 mL 离心管用于维持恒定湿度)和 3 个装有 20 g 鲜土和 5 mg 石英砂离心管被放置在培养桶中(1 L 黑色塑料桶), 3 个重复(n = 3). 另外将 3 个只装有二氧化碳的吸收装置和去离子水的的培养桶作为空白对照. 培养 7 d 后,以 1% 酚酞和甲基橙为 pH 指示剂,用 1 mol·L^{-1} HCl 滴定测定 CO_2 排放量. 土壤微生物呼吸(MR)单位采用 mg·$(kg·d)^{-1}$.

土壤水解酶活性参照 Saiya-Cork 等[20]描述的 96 微孔板荧光光度法测定,其中 BG 酶底物为 4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡萄糖苷(4-MUB-β-D-glucopyranoside),CBH 酶底物为 4-甲基伞形酮酰-β-D-纤维二糖糖苷(4-MUB-β-D-cellobioside),并在培养结束后使用多功能酶标仪(Tecan Infinite M200,奥地利)检测荧光值,激发光和检测波长分别为 365 nm 和 450 nm；土壤氧化酶活性参考 DeForest 等[21]描述的方法测定,PO 和 PER 酶底物均采用左旋多巴(L- dihydroxyphenylalanine)和乙二胺四乙酸二钠(EDTA-3Na)1∶2混合液,并在培养结束后使用多功能酶标仪测定 460 nm 波长时的吸光值. 酶活性单位采用nmol·$(g·h)^{-1}$.

1.5 数据处理

土壤活性有机碳含量(g·kg^{-1})采用公式[22]:

$$\text{Labile organic C} = \text{SOC} - \text{Recalcitrant organic C} \quad (1)$$

式中, SOC 为土壤有机碳含量(g·kg^{-1})；Recalcitrant organic C 为土壤惰性有机碳含量(g·kg^{-1}).

土壤微生物熵 qMB(mg·g^{-1})计算公式[23]:

$$q\text{MB} = \text{MBC}/\text{SOC} \quad (2)$$

式中,MBC 为土壤微生物量碳含量(mg·kg^{-1}).

土壤微生物代谢熵 $q$$CO_2$($d^{-1}$)计算公式[23]:

$$q\text{CO}_2 = \text{MR}/\text{MBC} \quad (3)$$

式中,MR 为土壤微生物呼吸[mg·$(kg·d)^{-1}$].

利用 Excel 2010 和 SPSS 23.0 软件对试验数据进行统计分析. 不同恢复年限土壤物理性质、碳库组分、碳降解酶活性、微生物呼吸及其熵值的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行分析,所有数据均采用最小显著差异(least significant difference,LSD)法进行多重比较(α = 0.05). 相关性分析(Correlation analysis)和偏最小二乘路径模型(Partial least squares-path model,PLS-PM)用于土壤物理性质、碳库组分、碳降解酶活性、微生物呼吸及其熵值之间的关系分析. 相关性分析和偏最小二乘路径模型使用 R 软件(4.0.1 版本)完成并用 Photoshop 完成作图.

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限刺槐林土壤微生物呼吸及其熵值变化

不同恢复年限刺槐林土壤微生物呼吸及其熵值(土壤微生物代谢熵和微生物熵)变化见表 2. 随刺槐林龄增加,土壤微生物量碳不断增加,在恢复前期(0 ~ 14 a)增加并不明显,但从恢复 14 ~ 45 a 显著增加了 6.3 倍(P < 0.05)；土壤微生物呼吸在恢复前期(0 ~ 14 a)显著增加了 1.4 倍(P < 0.05),在 20 ~ 30 a 之间下降了 0.4 倍(P < 0.05),在恢复 14 ~ 20 a 并无显著差异(P > 0.05)；同时土壤微生物代谢熵随刺槐林龄增加呈先增后减的趋势(P < 0.05),最大值和最小值出现在 14 a 和 45 a,从农田到恢复 14 a 显著增加了 1.4 倍(P < 0.05),在恢复 14 ~ 45 a 之间显著下降了 0.9 倍(P < 0.05)；微生物熵总体上呈现随刺槐林龄增加不断增加的趋势,但在农田到植被恢复 14 a 期间下降了 0.3 倍,随后在各恢复年限显著增加(P < 0.05).

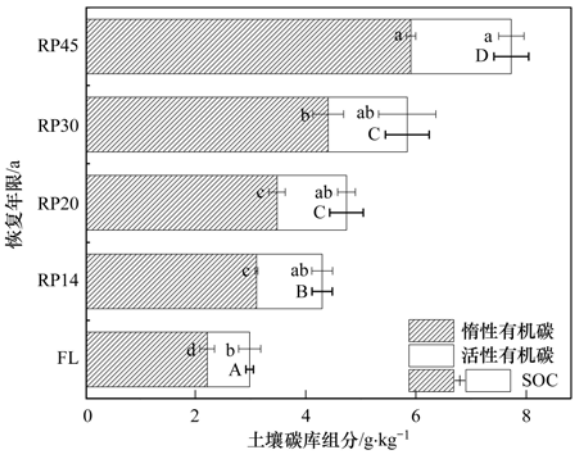
2.2 不同恢复年限刺槐林土壤碳库组分变化

不同恢复年限刺槐林土壤的碳库组分变化如图 1 所示. 土壤有机碳含量随着刺槐林龄的增加而增加,但在恢复前期(14 ~ 20 a)并无显著差异(P > 0.05),在恢复 30 ~ 45 a 之间显著增加了 0.3 倍(P < 0.05)；土壤活性有机碳总体上呈现增加的趋势,

表 2　不同恢复年限刺槐林土壤微生物呼吸及其熵值变化

Table 2　Changes in soil microbial respiration and its entropy in *Robinia pseudoacacia* forests with different restoration years

项目	土壤微生物量碳 /mg·kg^{-1}	土壤微生物呼吸 /mg·(kg·d)$^{-1}$	土壤微生物代谢熵 /d^{-1}	土壤微生物熵 /mg·g^{-1}
FL	30.13 ± 2.31c	36.37 ± 2.20c	1.22 ± 0.10b	10.13 ± 0.89cd
RP14	31.68 ± 4.78c	88.37 ± 3.41a	2.93 ± 0.47a	7.37 ± 1.07d
RP20	80.17 ± 10.55bc	89.82 ± 1.96a	1.16 ± 0.15bc	16.89 ± 1.98bc
RP30	122.58 ± 11.14b	54.22 ± 3.03b	0.45 ± 0.07cd	21.29 ± 2.74b
RP45	232.50 ± 31.60a	50.40 ± 6.84b	0.24 ± 0.07d	30.44 ± 5.06a



小写字母表示不同林龄刺槐林之间惰性和活性有机碳的差异(P < 0.05),大写字母表示不同林龄刺槐林之间土壤有机碳的差异(P < 0.05),n = 3

图 1　不同恢复年限刺槐林土壤碳库组分变化

Fig. 1　Changes in soil carbon pool components in *Robinia pseudoacacia* forests with different restoration years

但在恢复期间(14 ~ 30 a)并无显著差异(P > 0.05);土壤惰性有机碳在恢复期间与土壤有机碳呈现相同的趋势,而在恢复前期(14 ~ 20 a)无显著差异(P > 0.05).

2.3　不同恢复年限刺槐林土壤碳降解酶活性变化

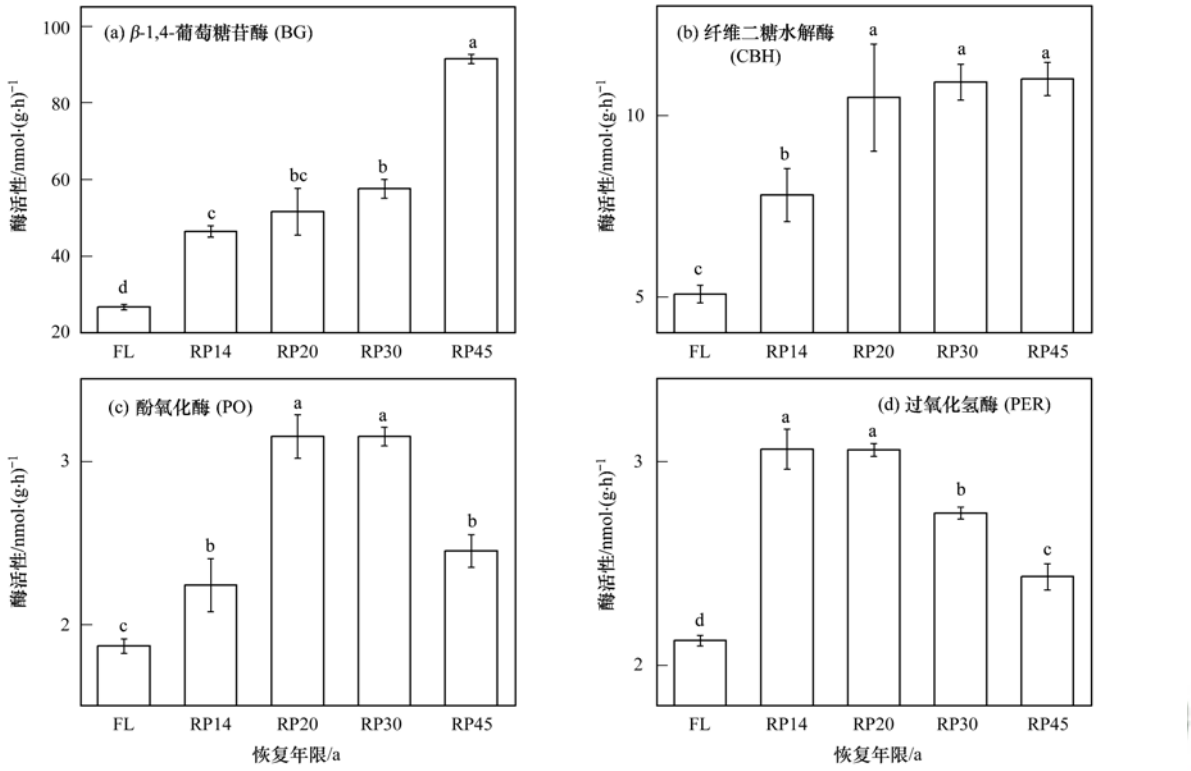
不同恢复年限刺槐林土壤碳降解酶活性如图 2 所示,BG、CBH、PO 和 PER 这 4 种酶活性的变化范围分别为 26.68 ~ 91.46、5.06 ~ 11.01、1.86 ~ 3.15 和 2.12 ~ 3.05 nmol·(g·h)$^{-1}$. 农田退耕还林后,BG 酶的活性随刺槐林龄的增加显著增加(P < 0.05),恢复 14、20、30 和 45 a 土壤 BG 酶活性较农田土壤分别增加了 0.7、0.9、1.2 和 2.4 倍(P < 0.05);土壤 CBH 酶随刺槐林龄的增加表现出先增加后稳定的趋势,从农田到恢复 20 a 显著增加了 1.1 倍(P < 0.05),随后各恢复年限并无显著差异(P > 0.05);PO 和 PER 酶活性均随恢复年限呈先增加后降低趋势,最大值分别在 20 a 和 14 a,相比较农田分别增加了 0.7 倍和 0.4 倍.

同样,在植被恢复的过程中这 2 种水解酶(BG + CBH)和 2 种氧化酶(PO + PER)呈现不同的变化趋势(图 3). 水解酶随刺槐林龄的增加而显著增加(P < 0.05),并且恢复 14、20、30 和 45 a 土壤水解酶相较于农田分别增加了 0.7、1.0、1.2 和 2.2 倍(P < 0.05);而氧化酶在植被恢复期间,总体上呈现先增加后降低的变化趋势,其中最大值和最小值分别出现在恢复 20 a 和农田.

2.4　土壤碳降解酶活性和碳库组分与微生物呼吸及其熵值的关系

为探讨土壤碳降解酶活性和碳库组分与微生物呼吸及其熵值之间的关系,进行了相关性分析(图 4). 如图 4 所示,刺槐林的恢复对土壤碳库组分、碳降解酶活性和微生物呼吸影响显著. 从中可知 BG、CBH、PO 和 PER 酶均与黏粒呈显著正相关(P < 0.05),其中 Hy-EEA(BG + CBH)水解酶与土壤有机碳、微生物量碳、微生物熵、惰性和活性有机碳呈显著正相关;对 Oy-EEA(PO + PER)氧化酶而言,与微生物呼吸呈极显著正相关(P < 0.01). Hy-EEA(BG + CBH)水解酶与黏粒呈显著负相关(P < 0.05),与容重呈极显著负相关(P < 0.01);PER 酶与砂粒呈极显著负相关(P < 0.01).

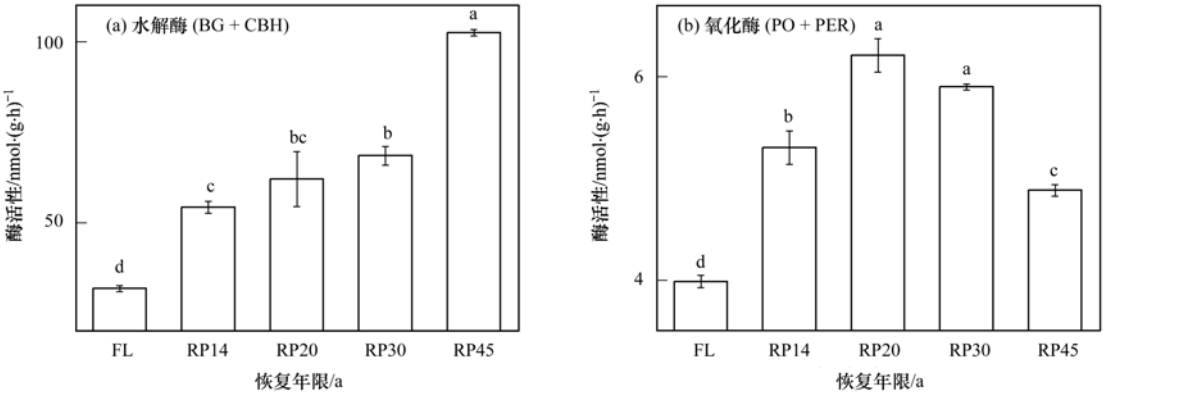
为进一步探究土壤碳降解酶活性和碳库组分与微生物呼吸及其熵值的响应关系,进行了偏最小二乘路径模型分析,模型拟合优度为 0.770,且拟合结果显著[P < 0.05,图 5(a)]. 结果表明,人工刺槐林林龄的增加对土壤水解酶和惰性有机碳有着极显著的正相关效应[P < 0.001,图 5(a)],与氧化酶呈极显著的负相关关系[P < 0.001,图 5(a)]. 在该模型中,人工刺槐林恢复可以通过影响氧化酶活性(β = −0.876, P < 0.001)或惰性有机碳含量(β = 1.12, P < 0.001)来间接影响土壤微生物代谢,而且惰性有机碳是植被恢复影响土壤微生物代谢的关键环节[图 5(b)]. 此外,刺槐林恢复还可以通过改变土壤物理性质(主要为粉粒和容重)来间接影响水解酶惰性和活性有机碳组分含量,从而改变微生物代谢;同时亦可直接改变土壤物理性质来间接影响微生物,但刺槐林恢复并未对土壤物理性质造成显著影响(β = −0.377, P > 0.05). 总而言之,人工刺槐林恢复并未直接对微生物造成影响,而主要是通过改变碳降解酶活性或者土壤惰性有机碳库组分含量,



小写字母表示不同林龄刺槐林之间的差异($P<0.05$), $n=3$

图 2 不同恢复年限刺槐林土壤碳降解酶活性的变化

Fig. 2 Changes in soil carbon-degrading enzyme activities in *Robinia pseudoacacia* forests with different restoration years



小写字母表示不同林龄刺槐林之间的差异($P<0.05$), $n=3$

图 3 不同恢复年限刺槐林土壤碳降解酶活性的变化

Fig. 3 Changes in soil carbon-degrading enzyme activities in *Robinia pseudoacacia* forests with different restoration years

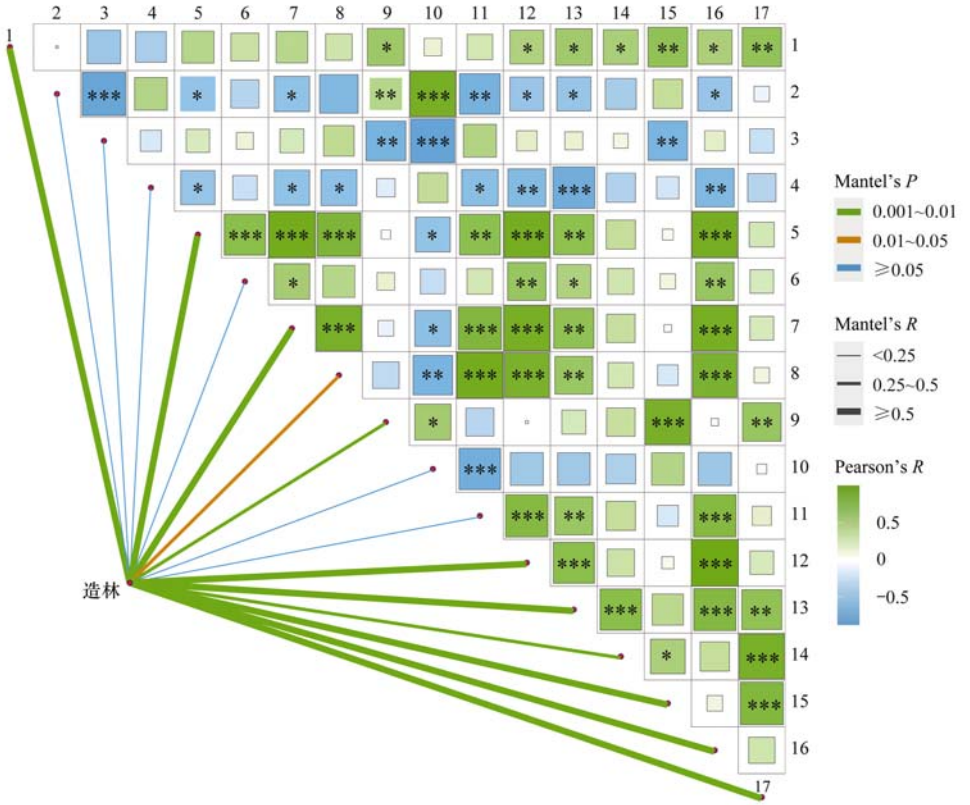
从而间接影响了微生物的代谢和生长.

3 讨论

3.1 人工林恢复下土壤碳降解酶活性和碳库组分的变化特征

土壤酶参与土壤碳库分解转化、影响微生物呼吸及生长代谢,进而加速了物质转化过程与能量循环变化,是评价植被恢复过程中土壤质量的重要生物活性指标[24]. 本研究发现农田退耕后,土壤酶活性在人工刺槐林种植前期显著增加,说明植被恢复后土壤生物学性质得到改善,这可能与植物凋落物、根系分解以及植物根系分泌物等植物来源碳含量增加有关[25]. 但在刺槐林恢复后期,氧化酶(PO + PER)和 CBH 酶活性均会有不同程度地降低[图 2(b)和图 3(b)],这可能与刺槐林恢复过程中土壤物理组分如粉粒和砂粒没有发生明显的变化有关(表 1),前人研究认为土壤物理组分表面能提供酶分解过程所需的反应位点,土壤物理组分含量的增加可能增加酶活性[26~28].

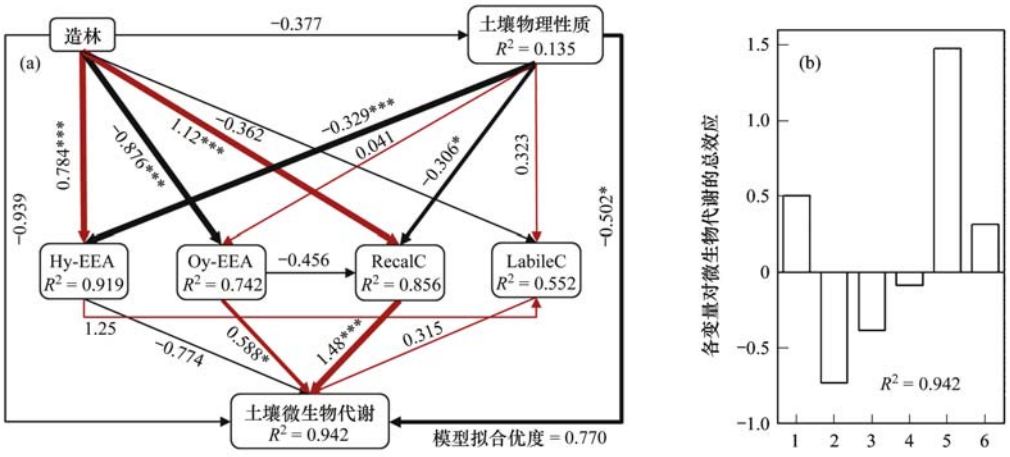
在人工刺槐林植被恢复过程中,土壤有机碳和惰性有机碳含量随着刺槐林龄的增加而显著增加,同前人研究结果相似,人工植被恢复能显著提高土



1. 黏粒, 2. 粉粒, 3. 砂粒, 4. 容重, 5. 土壤有机碳, 6. 活性有机碳, 7. 惰性有机碳, 8. 土壤微生物量碳, 9. 土壤微生物呼吸, 10. 微生物代谢熵, 11. 微生物熵, 12. BG(β-1,4-葡萄糖苷酶), 13. CBH(纤维二糖水解酶), 14. PO(酚氧化酶), 15. PER(过氧化物酶), 16. Hy-EEA(水解酶), 17. Oy-EEA(氧化酶); 通过曼特尔检验刺槐林造林对土壤碳库组分、碳降解酶活性和微生物呼吸及其熵值相关,边缘宽度对应曼特尔 R 统计量,边缘颜色表示其显著性; 皮尔逊 R 值表示两个指标之间的相关系数,其中 * 表示 0.05 水平差异显著, ** 表示 0.01 水平差异显著, *** 表示 0.001 水平差异显著, $n=12$

图 4　土壤碳降解酶活性和碳库组分与微生物呼吸及其熵值的相关性分析

Fig. 4　Correlation analysis of soil microbial carbon metabolism characteristics, carbon pool components, and carbon metabolism enzyme activities



(a)不同恢复年限、土壤物理性质、碳降解酶(水解酶和氧化酶)和土壤碳库(惰性和活性有机碳)作为影响微生物代谢驱动因子的偏小二乘路径模型; 红色和黑色箭头显示的是影响路径,数字为路径系数,表示关系的影响大小,即 β 值,红色箭头表示正相关,黑色箭头表示负相关; 箭头宽度与路径系数的强度成正比,其中 * 表示 0.05 水平差异显著, ** 表示 0.01 水平差异显著, *** 表示 0.001 水平差异显著; (b)1. 造林, 2. 土壤物理性质, 3. 水解酶, 4. 氧化酶, 5. 惰性有机碳, 6. 活性有机碳; 各类驱动因素对微生物代谢的影响的总效应,最终模型只显示共线性偏差(方差膨胀系数 <10)的指标, $n=12$

图 5　土壤微生物代谢影响因素的偏最小二乘路径模型和各变量对微生物代谢的总效应

Fig. 5　Partial least squares-path model(PLS-PM) for influencing factors of soil microbial metabolism and the total effect of each variable on microbial metabolism

壤有机碳及组分碳库[29]. 在薛莲等[30]的研究中,分别对黄土丘陵区人工刺槐林总有机碳、活性有机碳与其生长年限进行耦合分析发现,随林龄增加,总有机碳与活性有机碳均线性增加. 而在本研究中土壤活性有机碳含量在刺槐林各恢复年限并无显著差异,其原因可能是黄土高原具有特殊的地理气候,存在一定的干湿交替现象,再加上样地具有特殊的小气候,多次的干湿交替激发土壤有机碳的矿化,提高了土壤活性碳库的降解速率和大小,降低了惰性有机碳的降解[31]. 董扬红等[32]在对黄土高原不同植被类型下土壤活性有机碳组成特性研究得出,不同植被类型恢复下土壤碳库以惰性有机碳为主的结论. 同样在本研究中,刺槐林各恢复年限土壤有机碳的平均增量有 78.92% 来自于惰性有机碳,也证明了这一点(图 1).

3.2 人工林恢复模式下土壤碳降解酶活性和碳库组分与微生物代谢的关系

土壤酶参与一系列的土壤生化过程,与土壤有机碳转化密切相关[33]. 在植被恢复过程中,大量的外源碳进入土壤会被土壤碳降解酶分解释放低分子量的糖,为微生物生长代谢提供重要的碳源和能量源[34],对土壤微生物呼吸具有一定的激发效应[35]. 偏最小二乘路径模型显示,人工刺槐林恢复可以通过影响土壤氧化酶(PO + PER)活性来间接影响土壤微生物代谢,而且微生物呼吸和氧化酶活性随刺槐林龄表现出相同的变化趋势,这与 Xiong 等[36]的研究结果相似,即:土壤呼吸和转化酶活性变化具有一致性,两者具有正相关关系. 但是水解酶(BG + CBH)活性却和土壤微生物呼吸呈现出不同的显著结果(图 4),其原因可能是一方面不同酶具有不同的功能[37],在植被恢复不同阶段微生物所利用的倾向不同; 另一方面刺槐林在植被恢复过程中植被-土壤系统中可能会出现 N 或者 P 限制[38],进而促进或抑制了不同碳降解酶活性的表达,影响微生物活性. 有研究得出 β-1,4-葡萄糖苷酶等水解酶对土壤有机碳的累积有着直接的正效应[39]. 在本研究中,水解酶(BG + CBH)活性与 qMB 成正比($P < 0.05$),与 qCO_2 成反比(图 4),说明 BG 和 CBH 酶活性越高,微生物呼吸消耗的碳比例越小,生成微生物量碳的比例就越高,这意味着 BG 和 CBH 酶对土壤的碳汇具有积极的正效应.

偏最小二乘路径模型表明,人工刺槐林恢复主要是通过影响土壤惰性有机碳含量来间接影响土壤微生物代谢[图 5(a)]. 究其原因可能是,从微生物生存策略角度来说,微生物更易利用活性碳库(如刚进入土壤的新鲜有机质),随着恢复的进行,会有大量惰性有机碳库积累,这也就刺激了微生物会分泌大量的水解酶分解活性物质来提供满足微生物自身代谢和生长所需的能源,但随着人工刺槐林恢复年限的增加,惰性有机碳的占比增加致使微生物可直接利用的碳源不断减少,从而在刺槐林恢复后期在一定程度上抑制了微生物活性,微生物呼吸降低(表 2). 通常来说,土壤有机碳大部分都保存在黏粒和粉粒中[40],土壤矿物组分含量对土壤有机碳的分解速率有一定的影响,质地越重的土壤分解速率越小,有机碳含量就越高[41],这表明土壤物理组分可以直接影响微生物代谢[图 5(a)]. 其可能的原因是土壤物理组分如粉粒和黏粒,具有较大的表面积,更易与土壤中的有机质结合形成土壤团聚体,对有机质形成一种物理保护作用,减缓了微生物对底物的利用[42],进而影响了微生物代谢. 有研究发现,在植被恢复过程中,较高的 qMB 和较低的 qCO_2 说明微生物可以满足自己生态系统的平衡,无需从外界获取更多的能量来维持生态系统的稳定性[30,43]. 本研究中 qMB 和 qCO_2 随人工刺槐林恢复过程表现出同薛莲等[30]的研究结果相似的趋势(表 2),即:在人工刺槐林恢复过程中其生态系统可能会趋于平衡稳定的状态.

总而言之,在人工刺槐林植被恢复过程中,大量的外源碳进入土壤给微生物提供足够的碳源,微生物需要通过分泌更多水解酶(BG + CBH)来促进木质素的分解,加快被木质素包裹的纤维素释放[21],从而能够为参与纤维素分解的酶提供充足的底物,促进活性有机碳的形成. 而微生物分泌的氧化酶(PO + PER)主要是通过将土壤中的简单芳香族化合物氧化成醌类物质,醌类物质能够与土壤中蛋白质和糖类等物质反应生成复杂的有机物质[44],从而能够有效减少微生物对有机物质的利用,利于活性碳库的转化保留,进而增加惰性有机碳含量,达到了固碳的效果. 但是醌类物质并不能直接为微生物提供降解所需的碳源[25],因此在恢复后期,微生物并未增加氧化酶(PO + PER)的分泌,而是通过增加水解酶(BG + CBH)的活性来分解足够多的活性碳物质来满足自身的生长和代谢.

4 结论

(1)在本研究中,人工刺槐林恢复初期显著提升土壤微生物呼吸,而且微生物熵(qMB)随刺槐林龄的增加显著增加,微生物代谢熵(qCO_2)则相反.

(2)随着人工刺槐林植被恢复,土壤有机碳和惰性有机碳含量显著积累,活性有机碳无明显变化.

(3)刺槐造林前期显著增加了土壤碳降解酶活

性,但在恢复后期氧化酶(PO + PER)和 CBH 酶活性呈现不同程度的降低趋势.

(4)相关性分析表明土壤微生物碳降解酶活性与土壤碳库组分存在显著的相关关系;偏最小二乘路径模型表明惰性有机碳组分是植被恢复影响土壤微生物代谢的关键环节.

(5)总之,人工刺槐林种植对土壤的碳汇具有积极的正效应,而且随着刺槐林的恢复年限的增长其生态系统可能会趋向平衡稳定的状态.

参考文献:

[1] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, **10**(2): 423-436.

[2] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, **123**(1-2): 1-22.

[3] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, *et al*. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **164**: 80-89.

[4] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, *et al*. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **60**: 77-86.

[5] Knorr W, Prentice I C, House J I, *et al*. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. Nature, 2005, **433**(7023): 298-301.

[6] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, *et al*. Soil carbon sequestration potential for "Grain for Green" project in Loess Plateau, China[J]. Environmental Management, 2011, **48**(6): 1158-1172.

[7] Shao S, Zhao Y, Zhang W, *et al*. Linkage of microbial residue dynamics with soil organic carbon accumulation during subtropical forest succession[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **114**: 114-120.

[8] Jones D L, Nguyen C, Finlay R D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface[J]. Plant and Soil, 2009, **321**(1-2): 5-33.

[9] Kato T, Tang Y H, Gu S, *et al*. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, **124**(1-2): 121-134.

[10] Fuchs R, Schulp C J E, Hengeveld G M, *et al*. Assessing the influence of historic net and gross land changes on the carbon fluxes of Europe[J]. Global Change Biology, 2016, **22**(7): 2526-2539.

[11] Borie F, Rubio R, Rouanet J L, *et al*. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol[J]. Soil and Tillage Research, 2006, **88**(1-2): 253-261.

[12] Geisseler D, Horwath W R, Scow K M. Soil moisture and plant residue addition interact in their effect on extracellular enzyme activity[J]. Pedobiologia, 2011, **54**(2): 71-78.

[13] Wei M M, Xu G P, Guo H R, *et al*. Effect of vinasse application on soil in sugarcane fields[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **700**: 270-275.

[14] Kardol P, Cregger M A, Campany C E, *et al*. Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects[J]. Ecology, 2010, **91**(3): 767-781.

[15] Wang H Y, Wu J Q, Li G, *et al*. Changes in soil carbon fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau[J]. Ecology and Evolution, 2020, **10**(21): 12211-12223.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[17] Rovira P, Vallejo V R. Examination of thermal and acid hydrolysis procedures in characterization of soil organic matter[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, **31**(1-2): 81-100.

[18] Stotzky G, Goos R D. Effect of high CO_2 and low O_2 tensions on the soil microbiota[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1965, **11**(5): 853-868.

[19] Yuan X B, Niu D C, Gherardi L A, *et al*. Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: evidence from a long-term grassland experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **138**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107580.

[20] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(9): 1309-1315.

[21] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and $_L$-DOPA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1180-1186.

[22] Maia S M F, Xavier F A S, Oliveira T S, *et al*. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil[J]. Agroforestry Systems, 2007, **71**(2): 127-138.

[23] Liu W X, Xu W H, Hong J P, *et al*. Interannual variability of soil microbial biomass and respiration in responses to topography, annual burning and N addition in a semiarid temperate steppe[J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 259-267.

[24] Keiluweit M, Nico P S, Kleber M, *et al*. Are oxygen limitations under recognized regulators of organic carbon turnover in upland soils?[J]. Biogeochemistry, 2016, **127**(2): 157-171.

[25] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 411-421.
Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, *et al*. Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the Loess Hilly Region, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 411-421.

[26] Allison S D. Soil minerals and humic acids alter enzyme stability: implications for ecosystem processes[J]. Biogeochemistry, 2006, **81**(3): 361-373.

[27] Zhong Z K, Han X H, Xu Y D, *et al*. Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(9): 1070-1082.

[28] Naidja A, Huang P M, Bollag J M. Enzyme-clay interactions and their impact on transformations of natural and anthropogenic organic compounds in soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(3): 677-691.

[29] Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, *et al*. Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, **23**(4), doi: 10.1029/2009GB003488.

[30] 薛莲, 刘国彬, 潘彦平, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(4): 1458-1464.

Xue S, Liu G B, Pan Y P, *et al*. Evolution of soil labile organic matter and carbon management index in the artificial robinia of Loess Hilly area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, **42**(4): 1458-1464.

[31] Meisner A, Snoek B L, Nesme J, *et al*. Soil microbial legacies differ following drying-rewetting and freezing-thawing cycles[J]. The ISME Journal, 2021, **15**(4): 1207-1221.

[32] 董扬红, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 143-148.
Dong Y H, Zeng Q C, An S S, *et al*. Effects of different forest types on soil active organic carbon and soil humus composition in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(1): 143-148.

[33] Liyanage L R M C, Sulaiman M F, Ismail R, *et al*. Carbon mineralization dynamics of organic materials and their usage in the restoration of degraded tropical tea-growing soil [J]. Agronomy, 2021, **11**(6): 1191.

[34] Davidson E A, Ishida F Y, Nepstad D C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest [J]. Global Change Biology, 2004, **10**(5): 718-730.

[35] Sinsabaugh R L, Gallo M E, Lauber C, *et al*. Extracellular enzyme activities and soil organic matter dynamics for northern hardwood forests receiving simulated nitrogen deposition [J]. Biogeochemistry, 2005, **75**(2): 201-215.

[36] Xiong D, Gao Z Z, Fu B, *et al*. Effect of pyrimorph on soil enzymatic activities and respiration[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, **56**: 44-48.

[37] Tischer A, Blagodatskaya E, Hamer U. Extracellular enzyme activities in a tropical mountain rainforest region of southern Ecuador affected by low soil P status and land-use change[J]. Applied Soil Ecology, 2014, **74**: 1-11.

[38] 许淼平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2445-2454.
Xu M P, Ren C J, Zhang W, *et al*. Responses mechanism of C:N:P stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(7): 2445-2454.

[39] Xu H W, Qu Q, Chen Y H, *et al*. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. CATENA, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104812.

[40] Freixo A A, de A Machado P L O, dos Santos H P, *et al*. Soil organic carbon and fractions of a rhodic ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil [J]. Soil and Tillage Research, 2002, **64**(3-4): 221-230.

[41] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(2): 278-285.
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(2): 278-285.

[42] Lucas-Borja M E, Candel D, Jindo K, *et al*. Soil microbial community structure and activity in monospecific and mixed forest stands, under Mediterranean humid conditions[J]. Plant and Soil, 2012, **354**(1-2): 359-370.

[43] Zhou Z H, Wang C K, Jin Y. Stoichiometric responses of soil microflora to nutrient additions for two temperate forest soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, **53**(4): 397-406.

[44] Morris S J, Bohm S, Haile-Mariam S, *et al*. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(6): 1145-1156.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 2

Feb. 15, 2022

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China ····· LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, *et al.* (577)

Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability ····· ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)

Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou ····· HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)

$PM_{2.5}$ Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models ····· WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, *et al.* (608)

Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in $PM_{2.5}$ During Summer in Central China ····· SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, *et al.* (619)

Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City ····· CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, *et al.* (629)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in $PM_{2.5}$ in Zhejiang Province ····· LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, *et al.* (639)

Impact of Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ in Jiangsu Province from 2001 to 2019 ····· PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)

Comparison and Analysis of $PM_{2.5}$ Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model ····· GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, *et al.* (663)

Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 ····· FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, *et al.* (675)

Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O_3 Pollution Event in Ji'nan ····· SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, *et al.* (686)

Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong ····· YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, *et al.* (696)

Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass ····· ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, *et al.* (707)

Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer ····· YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, *et al.* (714)

Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China ····· ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, *et al.* (723)

Emission Characterstics of VOCs and *n*-alkanes from Diesel Forklifts ····· ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, *et al.* (735)

Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 ····· TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)

Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}C_{DIC}$ in a Karst River Basin, Southwestern China ····· XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)

Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake ····· XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, *et al.* (762)

Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events ····· ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, *et al.* (770)

Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen ····· BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, *et al.* (782)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City ····· PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, *et al.* (795)

Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River ····· GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, *et al.* (803)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ····· CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, *et al.* (813)

Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai ····· YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, *et al.* (826)

Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang ····· GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, *et al.* (837)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake ····· LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, *et al.* (847)

Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake ····· LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, *et al.* (859)

Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation ····· WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic ····· ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, *et al.* (878)

Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration ····· QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, *et al.* (887)

Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar ····· CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, *et al.* (896)

Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water ····· ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, *et al.* (907)

Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PN/A Granular Sludge ····· HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, *et al.* (920)

Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance ····· FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, *et al.* (928)

Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan ····· LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, *et al.* (936)

Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain ··· ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)

Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example ····· JU Tie-nan, LEI Mei (957)

Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China ····· MU De-miao, SUN Yue-bing (965)

Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area ····· HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, *et al.* (975)

Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas ····· ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, *et al.* (985)

Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years ····· REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, *et al.* (995)

Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth ····· CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, *et al.* (1004)

Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments ····· WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, *et al.* (1015)

Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation ··· CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, *et al.* (1023)

Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat ····· LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, *et al.* (1031)

Responses of Soil *PhoC* and *PhoD* Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers ····· YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, *et al.* (1040)

Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of *Robinia pseudoacacia* ····· LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, *et al.* (1050)

Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of *Pinus massoniana* Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas ····· JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, *et al.* (1059)

Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils ····· DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, *et al.* (1069)

Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil ····· HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, *et al.* (1077)

Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine ····· HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, *et al.* (1089)

Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province ····· WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, *et al.* (1097)

Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta ····· XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, *et al.* (1108)