

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力

赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳\*, 刘志平, 周怀平, 杨振兴

(山西农业大学资源环境学院, 太原 030031)

**摘要:** 基于连续 30 a(1992~2021 年)秸秆还田长期定位试验, 按照等碳量秸秆还田, 设置秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)、秸秆过腹还田(CM)和秸秆不还田(CK)这 4 个处理, 探讨长期不同秸秆还田方式对土壤有机碳、土壤活性有机碳组分、土壤碳库管理指数、酶活性和土壤有机碳矿化的影响, 揭示春玉米连作体系褐土有机碳矿化特征及其主要驱动因子, 为褐土区秸秆还田措施优化和固碳减排等提供科学依据. 结果表明: ①秸秆还田处理均提高了褐土土壤有机碳含量, CM 处理提高幅度最大, 且碳库管理指数提升效果最显著. ②SC 和 CM 处理的活性碳组分含量均上升, 而 SM 处理的易氧化有机碳含量显著降低. ③温度每升高 10°C, 矿化速率约提升 7.99 mg·(kg·d)<sup>-1</sup>. 不同秸秆还田处理土壤有机碳矿化速率顺序为: CM > SC > SM > CK. ④低温(15~25°C)条件下, CM 处理的温度敏感性最低, 最有利于碳库的积累, 能有效提高土壤有机碳库周转速率, 缩短周转时间, 可作为褐土管理的最佳秸秆还田模式. ⑤温度、土壤中 β-1,4-葡萄糖苷酶活性和 DOC 是褐土土壤有机碳矿化的主要驱动力. 有机碳组分和温度可以通过影响土壤酶活性, 进而影响土壤有机碳的矿化.

**关键词:** 秸秆还田; 土壤有机碳(SOC); 碳库管理指数(CPMI); 有机碳矿化; 玉米

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2353-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305166

## Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning

ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, XIE Wen-yan\*, LIU Zhi-ping, ZHOU Huai-ping, YANG Zhen-xing

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Based on a 30-year long-term positioning experiment of straw returning (1992-2021), four treatments were set according to equal carbon content of straw returning: straw mulching (SM), straw crushing (SC), cattle manure after straw using as fodder (CM), and control with no straw return (CK). The study aimed to investigate the effects of different straw returning methods on soil organic carbon, soil active organic carbon components, soil carbon pool management index, enzyme activity, and soil organic carbon mineralization and to reveal the characteristics and main driving factors of organic carbon mineralization in the brown soil of spring maize continuous cropping systems, providing a scientific basis for the optimization of straw returning measures and carbon sequestration and emission reduction in brown soil areas. The results showed that: ① straw returning treatments increased soil organic carbon content in brown soil, with the CM treatment increasing the most and the carbon pool management index increasing the most significantly. ② The active carbon content of the SC and CM treatments increased, whereas the easily oxidized organic carbon content of the SM treatment decreased significantly. ③ The soil organic carbon mineralization rate increased by 7.99 mg·(kg·d)<sup>-1</sup> when the temperature increased by 10 °C. The order of the soil organic carbon mineralization rate under different straw returning treatments was as follows: CM > SC > SM > CK. ④ Under low temperature (15-25°C) conditions, the temperature sensitivity was the lowest in the CM treatment and was the most beneficial for carbon pool accumulation. It could effectively improve the soil organic carbon pool turnover rate and shorten the turnover time, which could be used as the best straw returning mode for brown soil management. ⑤ Temperature; β-1,4-glucosidase activity; and DOC were the main driving forces of soil organic carbon mineralization in brown soil. Organic carbon components and temperature could affect soil organic carbon mineralization by influencing soil enzyme activity.

**Key words:** straw returning to field; soil organic carbon(SOC); carbon pool management index(CPMI); organic carbon mineralization; corn

中国是世界上重要的农业大国, 秸秆资源丰富, 在过去 60 多年间快速递增, 仅三大粮食作物的秸秆总产量已达到每年 6.5 亿 t<sup>[1]</sup>, 大量的农业秸秆将成为主要的农业固体废弃物, 秸秆的出路问题已经成为目前我国农村地区急需解决的一大难题. 由农作物产生的秸秆等农业废弃物被认为是农田土壤有机碳的最大来源, 秸秆的资源化利用有利于提高农业和环境可持续发展<sup>[2-6]</sup>. 土壤有机碳是衡量土壤肥力和质量的重要指标之一, 同时土壤有机碳在调节气候变化中也扮演着重要角色<sup>[7,8]</sup>. 土壤有机碳数量及其品质取决于输入到土壤中的有机物料数量和种类, 还取决于微生物主导的有机碳的分解和积累过程<sup>[2]</sup>. 土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过

程, 直接关系到土壤中养分元素的释放与供应、温室气体的形成以及土壤质量的保持等<sup>[7]</sup>. 在农田生态系统中, 土壤有机碳矿化主要受人活动、土壤特性和环境条件等的影响, 尤其是对温度变化响应非常敏感. 目前, 关于秸秆还田对土壤碳库及土壤碳矿化影响的研究已经较多, 主要集中在秸秆与耕作结合<sup>[3,9-12]</sup>、秸秆还田量<sup>[2]</sup>和秸秆与化肥配施<sup>[5,13-17]</sup>

收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-07-08

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202103021224124); 科技基础资源调查专项(2021FY100501); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901101-4); 山西省重点研发计划项目(202102140601010-4); 山西省科技重大专项计划项目(202101140601026-4-5)

作者简介: 赵宇航(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮循环, E-mail: zhaoyuhang0302@163.com

\* 通信作者, E-mail: xwy6018060@163.com

等对土壤有机碳含量、碳库管理指数和碳矿化特征等的影响.但是,不同研究者得到的研究结果不尽相同,吴萌等<sup>[14]</sup>研究结果表明秸秆还田配施化肥提高了土壤有机碳的累积矿化量,马欣等<sup>[15]</sup>研究结果表明秸秆还田配施化肥显著降低了土壤原有有机碳累积矿化率;有研究认为温度升高会加速有机碳的矿化<sup>[16]</sup>,也有研究指出升温对土壤有机碳矿化没有影响<sup>[17]</sup>.因此,针对特定的生产区域结合区域资源环境特征进行深入研究十分有必要.

褐土作为我国主要土壤类型之一,总面积约  $2.516 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,该地区是我国小麦和玉米主产区之一,作物秸秆资源十分丰富<sup>[18]</sup>.在过去30余年中,春玉米连作体系中玉米秸秆“直接还田”、“覆盖还田”、“过腹还田”等不同秸秆还田模式在褐土区广泛应用,但是鲜有研究深入理解关于长期不同秸秆还田模式下褐土土壤有机碳矿化过程的问题,对有机碳矿化的温度敏感性也鲜见详细报道.为此,本文以褐土区春玉米田为研究对象,基于农业农村部寿阳野外科学观测试验站长期(1992~2021年)不同秸秆还田模式定位试验,采用不同温度(15、25和35℃)对土壤样品进行室内培养,探讨长期不同秸秆还田模式下土壤有机碳矿化特征、有机碳矿化的温度敏感性及其主要驱动因子,以期为典型褐土区域秸秆还田措施优化、农田培肥和固碳减排等提供科学依据.

表1 长期秸秆还田试验设计

Table 1 Long-term straw returning test design

处理	施肥量			
	N/kg·hm <sup>-2</sup>	P/kg·hm <sup>-2</sup>	秸秆量/t·hm <sup>-2</sup>	湿牛粪/t·hm <sup>-2</sup>
CK(秸秆不还田)	150	84	0	0
SM(秸秆覆盖还田)	150	84	6	0
SC(秸秆粉碎直接还田)	150	84	6	0
CM(秸秆过腹还田)	150	84	0	45

### 1.3 土壤样品采集

土壤样品于2021年10月作物收获后采集.用直径5 cm的土钻在每个小区以“S”形取5个点的土壤(0~20 cm),混合为1个样品,每个小区取5份样,去除动植物残体和砂石等可见物,充分混匀后分为两份,一份置于阴凉处,待其自然风干后,过筛保存,用于土壤总有机碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳等土壤基本理化性状的测定;另一份装入具有冰袋的保温箱内带回实验室,冷藏于4℃冰箱中,测定前过2 mm筛,用于矿化培养及土壤微生物生物量碳、可溶性有机碳和土壤胞外酶的测定.

### 1.4 土壤样品测定

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定<sup>[19]</sup>;土壤易氧化有机碳(ROC)采用高锰酸钾

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

秸秆还田长期定位试验在山西省寿阳县宗艾村北坪(37°58'N, 113°06'E)旱塬地上进行,试验地海拔1130 m,年均气温7.4℃,无霜期约130 d,年均降水量501.1 mm,70%左右的降水集中在6~9月,属暖温带半湿润偏旱区.试验地块平坦,土层深厚,供试土壤为褐土.

### 1.2 试验设计

供试作物为春玉米,试验开始于1992年,截至2021年历时30 a,试验小区面积54 m<sup>2</sup>,无重复.按照等碳量还田共设置4个处理,分别为:①秸秆覆盖还田(SM);②秸秆粉碎直接还田(SC);③秸秆过腹还田(CM);④秸秆不还田(CK).化肥秋季施用是结合秋季深耕翻地进行化肥条施或全耕层深施(深度20 cm),生育期内不再追肥.SM处理是每年5月下旬,将前茬全部玉米秸秆均匀覆盖地表,当季玉米收获后,再将未腐解秸秆深翻还田;SC处理是当季玉米收获后,直接将秸秆铡碎(长15 cm)结合深耕还田;CM处理是将前茬玉米秸秆(与SM和SC处理秸秆等量)喂牛,将产生的牛粪腐熟,在当季玉米收获后均匀撒施并深翻还田.每个处理具体化肥施用量和秸秆还田量详见表1.

氧化法测定<sup>[20]</sup>;土壤可溶性有机碳(DOC)用去离子水浸提,TOC全自动分析仪测定<sup>[21]</sup>;土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法测定<sup>[22]</sup>.

土壤有机碳矿化培养:称取50 g过2 mm筛的鲜土,调节至田间持水量的60%,装入250 mL培养瓶中,称重记录,置于恒温培养箱中25℃温度下预培养10 d.培养开始前调节水分,瓶中放入10 mL 0.1 mol·L<sup>-1</sup>的氢氧化钠溶液吸收CO<sub>2</sub>,分别放于15、25和35℃培养箱黑暗培养40 d,分别在培养的1、3、6、10、15、20、25、30、35和40 d取出并更换氢氧化钠溶液,加水调节含水量.将氢氧化钠溶液取出,倒入锥形瓶内并用蒸馏水冲洗3次,加入2 mL mol·L<sup>-1</sup>的氯化钡溶液,滴入2滴酚酞指示剂,用0.1 mol·L<sup>-1</sup>标准盐酸滴定,每个处理设置3个重复,并

设置无土空白对照.

### 1.5 数据计算

根据式(1)~(5)进行碳素有效率及土壤碳库管理指数的计算<sup>[23]</sup>.

$$\text{碳库指数(CPI)} = \text{TOC} / \text{TOC}_{\text{CK}} \quad (1)$$

$$\text{稳态碳(NAOC)} = \text{TOC} - \text{ROC} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度(CPA)} = \text{AOC} / \text{NROC} \quad (3)$$

$$\text{碳库活度指数(CPAI)} = \text{CPA} / \text{CPA}_{\text{CK}} \quad (4)$$

$$\text{碳库管理指数(CPMI)} = \text{CPI} \times \text{CPAI} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{土壤有机碳矿化量(以 CO}_2\text{计, mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} = \frac{[c_{\text{HCl}} \times (V_{\text{空白}} - V_{\text{样品}}) \times 44] / 2 \times m}{2} \quad (6)$$

式中,  $V_{\text{空白}}$  和  $V_{\text{样品}}$  分别为空白和土壤样品 HCl 用量 (mL);  $c_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $m = 0.05 \text{ kg}$ ; 2 为转换系数.

温度系数( $Q_{10}$ )为温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 土壤有机碳矿化速率增加的倍数, 按以下公式计算:

$$Q_{10} = K_{T+10} / K_T \quad (7)$$

式中,  $K_T$  和  $K_{T+10}$  分别为温度  $T^\circ\text{C}$  和  $(T+10)^\circ\text{C}$  时的土壤有机碳矿化速率.

$$\text{土壤有机碳矿化速率[以 CO}_2\text{计, mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}\text{]} = \frac{\text{培养时间内有机碳矿化量(以 CO}_2\text{计, mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}}{\text{培养天数(d)}}$$

土壤有机碳的矿化采用一级动力学方程模拟:

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

式中,  $C_0$  为土壤潜在可矿化有机碳量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $C_t$  为培养时间  $t$  (d) 内的累积矿化量,  $t$  为培养时间 (d),  $k$  为生物活性有机碳库的周转速率常数 ( $\text{d}^{-1}$ ), 半周期  $T_{1/2} = \ln(2/k)$ .

### 1.6 数据处理

用 Excel 2019 进行数据整理, 采用 SPSS Statistics 26.0 进行方差分析以及相关分析, Duncan 进行多重比较; Origin Pro 2021 进行图表制

作, Sigmaplot 14.0 进行一级动力学方程拟合; 使用 R 软件中“lavaan”包构建结构方程模型(SEM), 以分析温度与有机碳组分影响下酶活性和有机碳累积矿化量的综合影响.

## 2 结果与分析

### 2.1 有机碳库及酶活性差异

从表 2 可以看出, 与 CK 相比, 秸秆覆盖还田 (SM)、秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 处理的土壤总有机碳含量分别显著提高了 16.06%、22.13% 和 45.41% ( $P < 0.05$ ), 秸秆过腹还田 (CM) 处理较秸秆覆盖还田 (SM) 和秸秆粉碎直接还田 (SC) 显著提高了 25.30% 和 19.06% ( $P < 0.05$ ). 说明秸秆还田处理均有利于土壤总有机碳的积累, 且秸秆过腹还田 (CM) 的土壤有机碳积累效果高于秸秆覆盖还田 (SM) 和秸秆粉碎直接还田 (SC).

秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 对土壤易氧化有机碳含量的提高效果显著, 分别较 CK 显著提高了 25.75% 和 154.08% ( $P < 0.05$ ), 秸秆过腹还田 (CM) 处理的土壤易氧化有机碳含量是秸秆粉碎直接还田 (SC) 的 2.02 倍, 二者差异显著 ( $P < 0.05$ ). 秸秆覆盖还田 (SM) 处理显著降低了土壤中易氧化有机碳含量, 较 CK 下降 20.17% ( $P < 0.05$ ).

秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 显著提高了土壤颗粒有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳含量 ( $P < 0.05$ ). 秸秆覆盖还田 (SM) 处理提高效果不显著 ( $P > 0.05$ ). SC 和 CM 处理土壤颗粒有机碳含量分别较 CK 显著提高了 38.68% 和 123.58% ( $P < 0.05$ ); SC 和 CM 处理土壤可溶性有机碳含量分别较 CK 显著提高了 86.79% 和 111.32% ( $P < 0.05$ ); SC 和 CM 处理土壤微生物量碳含量分别较 CK 显著提高了 114.58% 和 118.58% ( $P < 0.05$ ).

表 2 长期不同秸秆还田对土壤 SOC、ROC、POC、DOC 和 MBC 含量的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of long-term straw returning on SOC, ROC, POC, DOC, and MBC contents in soil

处理	$\omega(\text{SOC})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{ROC})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{POC})/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{DOC})/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{MBC})/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
CK	17.44 ± 1.02c	2.33 ± 0.13c	1.06 ± 0.08c	114.43 ± 22.75c	534.04 ± 7.54b
SM	20.24 ± 0.80b	1.86 ± 0.08d	1.13 ± 0.12c	133.86 ± 16.30bc	546.49 ± 1.51b
SC	21.30 ± 0.16b	2.93 ± 0.39b	1.47 ± 0.06b	213.74 ± 25.91ab	611.91 ± 13.58a
CM	25.36 ± 0.19a	5.93 ± 0.23a	2.37 ± 0.12a	241.81 ± 93.71a	633.24 ± 9.55a

1) SCO 表示土壤有机碳, ROC 表示易氧化有机碳, POC 表示颗粒有机碳, DOC 表示水溶性有机碳, MBC 表示微生物量碳; 每列不同小写字母表示不同秸秆还田处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

由表 3 可以看出, 秸秆覆盖还田 (SM)、秸秆粉碎直接还田 (SC) 处理和秸秆过腹还田 (CM) 处理的土壤稳态碳含量比 CK 处理分别显著增加了 21.49%、21.49% 和 28.51% ( $P < 0.05$ ). 秸秆覆盖还田 (SM)、秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 处理土壤

的碳库指数较 CK 分别显著增加了 16.16%、22.35% 和 45.70% ( $P < 0.05$ ). 与 CK 相比, 秸秆覆盖还田 (SM) 显著降低了土壤碳库活度 33.96%, 秸秆过腹还田 (CM) 显著提升了土壤碳库活度 97.80% ( $P < 0.05$ ). 秸秆覆盖还田 (SM) 处理土壤碳库活度指数较 CK 显著

降低了 33.99% ( $P < 0.05$ ), 秸秆过腹还田(CM)处理土壤碳库活度较秸秆粉碎直接还田(SC)显著增加了 92.23% ( $P < 0.05$ ). 秸秆过腹还田(CM)处理土壤碳库管理指数较秸秆覆盖还田(SM)和秸秆粉碎直接还田

(SC)显著增加了 275.58% 和 127.60% ( $P < 0.05$ ). 秸秆粉碎直接还田(SC)处理的土壤碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数与 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ ).

表 3 长期不同秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of long-term straw returning on soil carbon pool management index

处理	$\omega$ (NROC) /g·kg <sup>-1</sup>	碳库指数 (CPI)	碳库活度 (CPA)	碳库活度指数 (CPAI)	碳库管理指数 (CPMI)/%
CK	15.12 ± 1.02b	1.00 ± 0.00c	0.15 ± 0.01b	1.00 ± 0.09b	100.00 ± 8.88b
SM	18.37 ± 0.74a	1.16 ± 0.03b	0.10 ± 0.00c	0.66 ± 0.01c	76.67 ± 2.84c
SC	18.37 ± 0.41a	1.22 ± 0.06b	0.16 ± 0.02b	1.03 ± 0.16b	126.52 ± 20.50b
CM	19.43 ± 0.42a	1.46 ± 0.08a	0.31 ± 0.02a	1.98 ± 0.12a	287.96 ± 19.43a

1) NROC 表示稳态碳; 每列不同小写字母表示不同秸秆还田处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

不同秸秆还田方式显著增加了土壤  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)和纤维二糖水解酶(CBH)活性, 对  $\beta$ -1,4-木糖苷酶( $\beta$ X)的活性无显著影响(表 4).

秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)处理和秸秆过腹还田(CM)处理显著提高了土壤中  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)的活性, 分别较 CK 显著提高了 35.64%、95.59% 和 190.68% ( $P < 0.05$ ), 秸秆过腹还田(CM)处理下  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)的活性是秸秆覆盖还田(SM)处理的 2.14 倍, 是秸秆粉碎直接还田(SC)处理的 1.49 倍. 秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)处理和秸秆过腹还田(CM)处理土壤中纤维二糖水解酶(CBH)的活性, 分别较 CK 显著增加了 41.99%、58.63% 和 45.61% ( $P < 0.05$ ).

表 4 长期不同秸秆还田对土壤酶活性的影响<sup>1)</sup>

Table 4 Effects of different straw returning to field for a long time on soil enzyme activity

处理	$\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶 /nmol·(g·h) <sup>-1</sup>	$\beta$ -1,4-木糖苷酶 /nmol·(g·h) <sup>-1</sup>	纤维二糖水解 酶/nmol·(g·h) <sup>-1</sup>
CK	63.32 ± 1.57d	40.15 ± 9.29a	29.03 ± 3.86b
SM	85.89 ± 2.36c	49.88 ± 1.33a	41.22 ± 1.49a
SC	123.91 ± 2.36b	48.21 ± 15.50a	46.05 ± 2.97a
CM	184.06 ± 35.22a	39.26 ± 4.04a	42.27 ± 1.78a

1) 每列不同小写字母表示不同秸秆还田处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

## 2.2 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量

土壤有机碳矿化速率即土壤每天 CO<sub>2</sub> 的排放量, 分别将 15、25 和 35°C 条件下不同秸秆还田模式的有机碳矿化速率变化情况绘制如图 1. 从中可知, 不同秸秆还田方式处理土壤有机碳矿化速率在各温度条件下总体上均呈下降趋势, 根据其降幅可分为 3 个阶段: 1~10 d(培养初期)迅速减小, 为有机碳快速矿化阶段; 10~25 d(培养中期)缓慢下降, 为有机碳缓慢矿化阶段; 25~40 d(培养后期)趋于稳定, 为相对稳定阶段. 在 15°C 下, 不同秸秆还田方式处理矿化速率在 13.20~39.60 mg·(kg·d)<sup>-1</sup> 之间; 25°C 下, 矿

化速率在 17.01~60.13 mg·(kg·d)<sup>-1</sup> 之间; 35°C 下, 矿化速率在 20.24~92.40 mg·(kg·d)<sup>-1</sup> 之间. 由此可知, 在 15、25 和 35°C 这 3 个温度下, 温度每升高 10°C, 矿化速率约提升 7.99 mg·(kg·d)<sup>-1</sup>.

从 40 d 培养的平均值看, CM 处理在 15°C 下其土壤有机碳矿化速率为 24.90 mg·(kg·d)<sup>-1</sup>, 分别是 SC、SM 和 CK 处理的 1.23、1.32 和 1.45 倍, 在 25°C 下为 31.98 mg·(kg·d)<sup>-1</sup>, 分别是 SC、SM 和 CK 处理的 1.21、1.31 和 1.45 倍, 在 35°C 下为 44.77 mg·(kg·d)<sup>-1</sup>, 分别是 SC、SM 和 CK 处理的 1.20、1.36 和 1.48 倍. 在 3 个培养温度下, 秸秆还田各处理土壤有机碳矿化速率均表现为: CM > SC > SM > CK.

土壤有机碳矿化温度系数如表 5 所示,  $Q_{10}$  有效反映土壤有机碳矿化对温度变化的响应程度,  $Q_{10}$  越大表示对温度变化越敏感. 结果表明, 土壤有机碳的矿化对温度的响应在不同温度下有明显的差异, 温度从 15°C 增至 25°C,  $Q_{10}$  值为 1.28~1.30, 从 25°C 增至 35°C,  $Q_{10}$  值为 1.35~1.41, 表明在温度较高下土壤有机碳的矿化对温度的敏感性较高.  $Q_{10}$ (15~25°C) 不同处理对温度变化的响应程度基本一致, SM 和 SC 处理较 CM 敏感性高, 而  $Q_{10}$ (25~35°C) 由高到低顺序为: SC > CM > CK > SM, 表明 CK 与 SM 对温度的响应程度较低, 而 SC 与 CM 对温度的响应程度较高.

不同秸秆还田处理有机碳累积矿化量变化情况如图 2, 随着培养时间的延长, 不同温度下有机碳矿化累积量逐渐增加. 恒温培养 40 d 后, 15°C 下, 累积矿化量达到 628.03~900.83 mg·kg<sup>-1</sup>; 25°C 下, 累积矿化量达到 790.68~1 139.75 mg·kg<sup>-1</sup>; 35°C 下, 累积矿化量达到 1 012.00~1 513.60 mg·kg<sup>-1</sup>. 平均来看, 4 种秸秆还田措施土壤在温度升高条件下, 均显著提升了有机碳的累积矿化量, 25°C 和 35°C 的矿化量分别是 15°C 的 1.27 倍和 1.74 倍.

不同培养温度下, 不同秸秆还田处理土壤有机

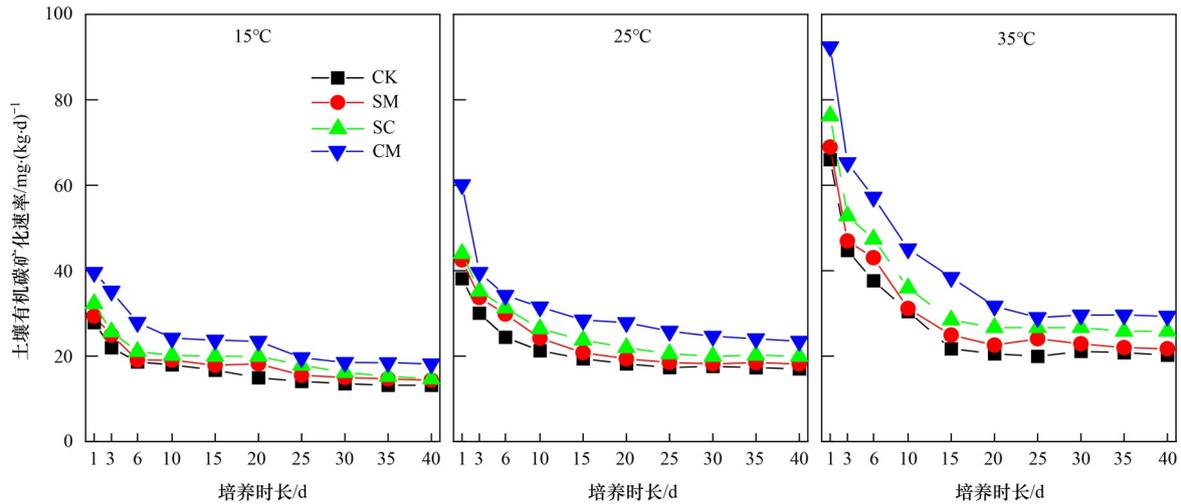


图 1 长期不同秸秆还田下土壤有机碳矿化速率的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in soil organic carbon mineralization rate under long-term straw returning

表 5 长期不同秸秆还田下土壤有机碳矿化的温度系数

Table 5 Temperature coefficient of soil organic carbon mineralization under different long-term straw returning

处理	$Q_{10}$	
	15~25°C	25~35°C
CK	1.28	1.37
SM	1.30	1.35
SC	1.30	1.41
CM	1.28	1.40

碳累积矿化量差异同样表现为：CM > SC > SM > CK. 秸秆还田各处理较 CK 处理均显著提高了土壤有机碳累积矿化量，增幅分别为：20.7%~73.5% (15°C)、17.5%~69.7% (25°C) 和 12.7%~54.0% (35°C)，均以 CM 处理提升效果最显著。

土壤有机碳累积矿化率是指培养时间内土壤有机碳矿化的量占总有机碳比例。相比于累积矿化量，累积矿化率不仅能够说明土壤有机碳矿化数量的大

小，而且能够反映土壤有机碳的相对稳定性和土壤固碳能力的强弱，并且此比例越低，土壤的固碳能力则越强，如若该比例越高，则固碳能力越弱。如图 3 所示，培养 40 d 后，随着温度的升高，累积矿化率均有所升高。说明温度升高会使土壤的固碳能力降低。低温 (15°C) 下，秸秆还田措施能够降低土壤有机碳的累积矿化率，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )，SM、SC 和 CM 与 CK 相比，分别降低了 5.28%、2.50% 和 1.39%；中温 (25°C) 下，SM 与 CK 相比，显著降低了 5.74% ( $P < 0.05$ )，SC 和 CM 与 CK 相比，分别降低了 1.99% 和 0.89%，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )；高温 (35°C) 下，秸秆还田措施会提高土壤有机碳的累积矿化率，与 CK 相比，SM、SC 和 CM 处理分别提高了 8.96%、9.14% 和 6.03%，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

对于土壤有机碳累积矿化量随培养时间的变化关系，利用一级动力学参数方程模拟： $C_t = C_0 \times$

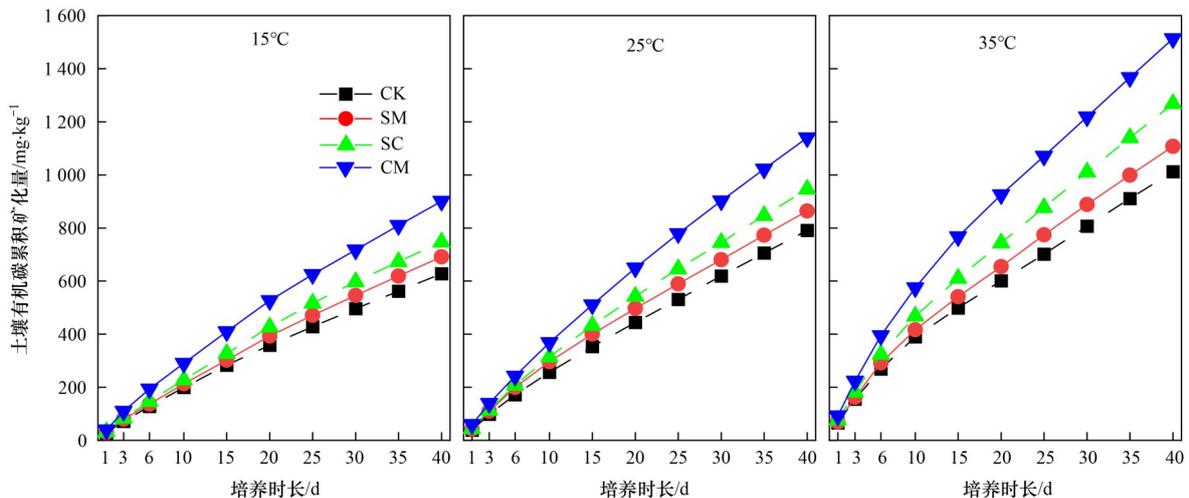
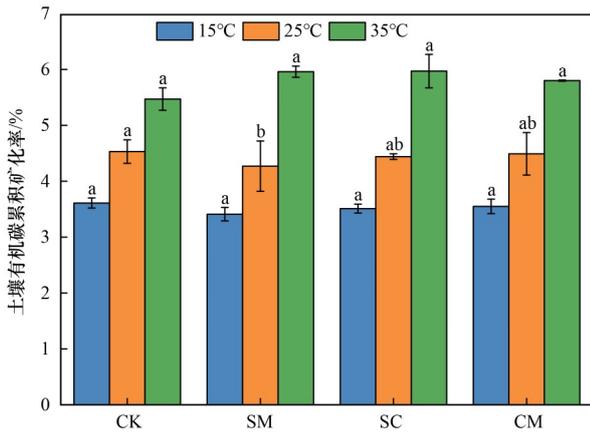


图 2 长期不同秸秆还田下土壤有机碳累积矿化量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in soil organic carbon accumulative mineralization under different straw returning for a long time



不同小写字母表示同一温度下不同处理间显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 3 长期不同秸秆还田下土壤有机碳的累积矿化率

Fig. 3 Cumulative mineralization rate of soil organic carbon under long-term straw returning

( $1 - e^{-kt}$ ), 相关系数  $R^2$  均在 0.99 以上, 说明拟合效果较好, 结果如表 6. 根据拟合结果, 15°C 下, 土壤潜在矿化碳库  $C_0$  达 1.280~1.687  $g \cdot kg^{-1}$ ; 25°C 下, 土壤潜在矿化碳库  $C_0$  达 1.497~2.252  $g \cdot kg^{-1}$ ; 35°C 下, 土壤潜在矿化碳库  $C_0$  达 1.416~2.084  $g \cdot kg^{-1}$ . 不同秸秆还田处理土壤  $C_0$  大小:  $CM > SC > SM > CK$ . 其中, 不同秸秆还田处理土壤有机碳的潜在矿化碳库  $C_0$  值均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), CM、SC 和 SM 处理  $C_0$  值较 CK 依次提高了 8.14%、24.37% 和 40.86%, 说明秸秆过腹还田增加了土壤有机碳潜在矿化碳库. 与 CK 相比, CM 处理在 15、25 和 35°C 下均能有效提高土壤有机碳库周转速率, 缩短周转时间, 而 SM 和 SC 处理仅在 25°C 表现出缩短碳周转时间的作用.

2.3 有机碳累积矿化总量与土壤性质的关系

利用 4 个处理不同温度下土壤活性有机碳含量、

表 6 长期不同秸秆还田下土壤有机碳矿化的动力学参数<sup>1)</sup>

Table 6 Dynamic parameters of soil organic carbon mineralization under long-term straw returning

处理	温度/°C	$C_0/g \cdot kg^{-1}$	$k/d^{-1}$	$R^2$	$T_{1/2}/d$
CK	15	1.280c	0.016 9b	0.999 1	41.76a
	25	1.579a	0.016 6b	0.997 4	41.01a
	35	1.416b	0.029 3a	0.991 4	23.66b
SM	15	1.534b	0.014 8c	0.999 3	46.83a
	25	1.497b	0.020 8b	0.996 8	33.32b
	35	1.599a	0.027 9a	0.993 2	24.84c
SC	15	1.663b	0.014 9b	0.999 6	46.52a
	25	1.751b	0.018 9ab	0.998 0	36.67b
	35	1.904a	0.026 1a	0.993 7	26.56c
CM	15	1.687c	0.018 8a	0.999 0	36.87a
	25	2.252a	0.017 3a	0.998 3	40.07a
	35	2.084b	0.030 5a	0.995 0	22.73b

1) 每列不同小写字母表示同一处理下不同温度间差异显著 ( $P < 0.05$ )

酶活性与有机碳累积矿化量进行线性拟合发现,  $R^2$  在 0.086 8 ~ 0.999 9. 由表 7 可以看出, 有机碳累积矿化量随着温度增高而增加, 与土壤 SOC、ROC、POC、DOC、MBC 含量和 BG 活性呈显著正相关, 但与土壤  $\beta X$  和 CBH 活性相关性均不显著. 说明其累积矿化量受土壤 SOC、ROC、POC、DOC、MBC 含量和 BG 活性影响较大; 与土壤  $\beta X$  和 CBH 活性没有显著相关性.

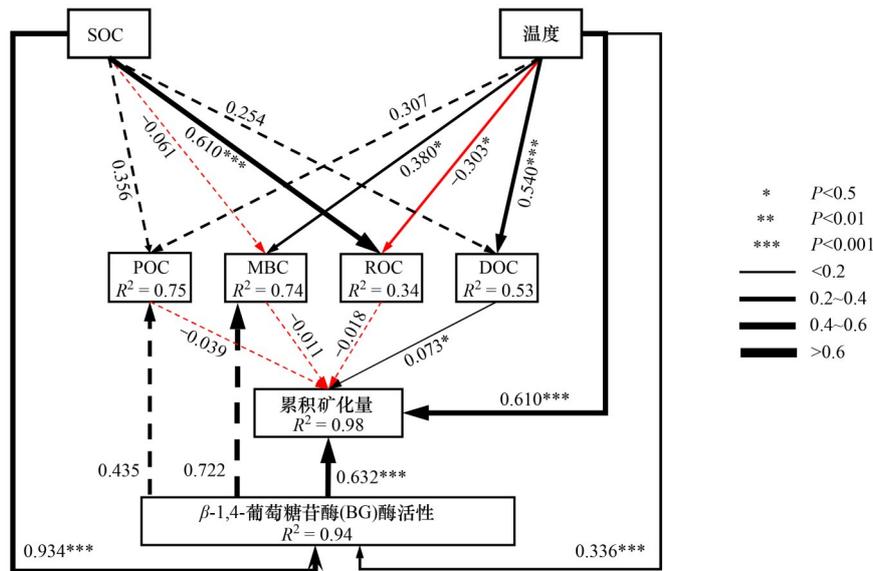
表 7 土壤活性有机碳含量、酶活性与有机碳累积矿化总量的关系<sup>1)</sup>

Table 7 Relationship between soil active organic carbon content, enzyme activity, and cumulative mineralization of organic carbon

温度/°C	项目	回归方程	$R^2$
15	SOC	$y = 0.035 2x - 0.981 3$	0.982 1**
	ROC	$y = 0.059 6x + 547.25$	0.875 5**
	POC	$y = 0.190 3x + 454.86$	0.964 7**
	DOC	$y = 1.748 6x + 434.02$	0.847 8**
	MBC	$y = 2.197 2x - 535.79$	0.837 1**
	BG	$y = 2.197 6x + 490.52$	0.989 4**
	$\beta X$	$y = -6.656 4x + 1 037.1$	0.096 6
	CBH	$y = 9.673 4x + 358.21$	0.373 7
	25	SOC	$y = 0.045 3x - 19.702$
ROC		$y = 0.077 2x + 683.36$	0.882 5**
POC		$y = 0.245 9x + 564.45$	0.968 8**
DOC		$y = 2.276 3x + 534.61$	0.863 8**
MBC		$y = 2.862 6x - 729.25$	0.854 3**
BG		$y = 2.841x + 610.44$	0.994 1**
$\beta X$		$y = -8.823 9x + 1 326.7$	0.102 1
CBH		$y = 12.442x + 441.9$	0.371 7
35		SOC	$y = 0.065 6x - 156.9$
	ROC	$y = 0.111 2x + 862.61$	0.861 6**
	POC	$y = 0.355 7x + 689.2$	0.953 2**
	DOC	$y = 3.419 4x + 623.73$	0.916 7**
	MBC	$y = 4.306 4x - 1 278.4$	0.909 2**
	BG	$y = 4.154 7x + 750.53$	0.999 9**
	$\beta X$	$y = -11.868x + 1 752$	0.086 8
	CBH	$y = 19.089x + 468.66$	0.451 1

1)\*\*表示  $P < 0.01$

土壤有机碳矿化的结构方程模型(图 4)适配度指标分别为  $\chi^2 = 9.23$ ,  $Df = 9$ ,  $\chi^2/Df = 1.026$ ,  $P = 0.416$ ,  $GFI = 0.999$ ,  $CFI = 0.999$ ,  $RMSEA = 0.027$ , 可以解释土壤有机碳累积矿化量 98% 的变异, 其中  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)酶活性对土壤有机碳累积矿化量的影响效果最为显著, 其次为温度和 DOC. 从结构方程模型(图 4)中可以看出, 温度可以直接影响土壤有机碳的矿化, 也通过影响土壤 DOC 和  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)酶活性, 间接影响土壤有机碳累积矿化量. 而 SOC 主要是通过影响  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)酶活性, 从而间接影响土壤有机碳的矿化.



SOC表示土壤有机碳,POC表示颗粒有机碳,MBC表示微生物量碳,ROC表示易氧化有机碳,DOC表示土壤可溶性有机碳;实线表示关系显著( $P < 0.05$ ),虚线表示关系不显著( $P > 0.05$ );箭头旁边的数字代表回归系数;黑色箭头表示关系为正,红色箭头表示关系为负;箭头的粗细表示回归关系强度; $R^2$ 表示有关变量的共同解释度

图4 土壤有机碳累积矿化量结构方程模型

Fig. 4 Structural equation model of soil organic carbon accumulative mineralization

### 3 讨论

#### 3.1 不同秸秆还田方式对有机碳组分的影响

本研究结果表明, 秸秆还田处理均有利于土壤总有机碳的积累, 且秸秆过腹还田(CM)的土壤有机碳积累效果和碳库管理指数高于秸秆覆盖还田(SM)和秸秆粉碎直接还田(SC), 这与张鹏等<sup>[2]</sup>、Li等<sup>[24]</sup>和朱敏等<sup>[25]</sup>的研究结果一致. 当有机肥进入土壤后, 不仅可以被土壤中的微生物分解利用, 而且有机肥中的活性组分还直接使土壤中易氧化有机碳含量增加. 在有机肥腐解过程中, 会释放出大量水溶性有机化合物, 因此土壤中水溶性有机碳含量也随之得以增长, 同时激发微生物活性及微生物量, 通过不断对秸秆进行分解和转化, 为微生物提供了充足的碳源, 进一步促进土壤微生物的生长, 使土壤微生物量碳的含量显著提升, 促进秸秆光合碳向土壤碳的转化, 进而提高土壤质量. 秸秆过腹还田(CM)处理的土壤易氧化有机碳含量显著高于秸秆粉碎直接还田(SC), 这是因为消化使秸秆初次降解, 再次施入土壤更容易被微生物利用. 秸秆覆盖还田(SM)处理显著降低了土壤中易氧化有机碳含量, 这是因为直接覆盖还田措施的秸秆分子量大, 且秸秆直接遮挡了部分表土, 一定程度上阻碍了空气的流通, 微生物降解需要的氧气少, 输入到土壤中的易氧化的有机碳就会降低. 并且土壤活性碳组分的含量与秸秆粉碎程度有关, 秸秆过腹和粉碎后的秸秆比不粉碎直接还田更有利于增加土壤活性碳组分的含量.

#### 3.2 不同秸秆还田方式对土壤酶活性的影响

玉米秸秆中的主要成分是纤维素、半纤维素以及木质素, 而秸秆还田后秸秆的完全降解需要3种类型的水解酶共同作用, 为微生物提供碳源<sup>[26,27]</sup>. 其中β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)能够催化水解芳基或烃基与糖基原子团之间的糖苷键生成葡萄糖; 纤维二糖水解酶(CBH)作用于结晶纤维素的链末端依次切开相隔的β-1,4-糖苷键, 释放纤维二糖; β-1,4-木糖苷酶(βX)可以水解木聚糖.

秸秆覆盖为微生物提供了适宜温度, 使得土壤微生物活性增强, 数量增多. 因此土壤酶的活性在垄作和秸秆覆盖条件下最高, 秸秆覆盖量越多, 活性越强<sup>[28,29]</sup>. 相比于秸秆不还田, 不同秸秆还田方式显著增加了土壤β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)和纤维二糖水解酶(CBH)活性, 而对β-1,4-木糖苷酶(βX)的活性无显著影响. 说明秸秆还田可能对β-1,4-木糖苷酶(βX)的活性的提高没有明显的促进作用.

#### 3.3 温度和不同秸秆还田方式对土壤有机碳矿化的影响

秸秆还田的耕作措施不仅影响土壤的基本性质、生物活性和土壤有机碳的积累, 同时也会影响土壤碳矿化, 土壤有机碳矿化所释放CO<sub>2</sub>是通过土壤微生物分解而产生的, 是土壤生物活性的总体体现. 秸秆还田通过影响土壤微生物的分解作用影响土壤有机碳的矿化. 本研究培养试验的第1d, 有机碳矿化速率就达到峰值, 可能是由于矿化初期土壤中存在易分解的活性有机物质, 为微生物提供了丰

富的营养, 微生物的活性最高, 使得有机碳矿化速率最快, 随后有机碳矿化速率缓慢降低, 随着培养时间的延长, 各处理的有机碳矿化速率基本一致. 此外, 本研究中各秸秆还田处理的土壤有机碳矿化速率变化均符合对数函数的关系:  $y = a + b \ln x$ , 表征培养时长每变化 1% 个单位, 矿化速率将变化  $b\%$  的绝对值(图 1), 与王兴凯等<sup>[30]</sup>、郭振等<sup>[31]</sup>和王朔林等<sup>[32]</sup>的研究结果相似. 原因在于土壤有机碳按分解的难易程度可以分为易氧化有机碳库和惰性有机碳库, 因为矿化初期活性碳库会被提前分解, 所以矿化初期速率较快, 而惰性碳库稳定性高, 很难分解, 所以随着活性碳的消耗, 矿化后期的矿化速率较慢. 在 15、25 和 35℃ 这 3 个温度下, 温度每升高 10℃, 矿化速率约提升  $7.99 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ . 不同秸秆还田处理土壤有机碳矿化速率差异表现为:  $\text{CM} > \text{SC} > \text{SM} > \text{CK}$ .  $Q_{10}$  的计算结果表明, 在高温(25~35℃)条件下, SC 与 CM 处理的温度敏感性高于 SM 处理, 说明高温情况下, 粉碎还田和过腹还田可能会造成土壤碳库的损失. 而在低温(15~25℃)条件下, CM 处理的温度敏感性最低, 考虑到寿阳县年均气温不足 10℃, 夏季平均气温也仅在 9~24℃ 之间, 所以在当地温度条件下秸秆过腹还田的土壤在有机碳与活性碳组分含量高的条件下, 仍会有利于土壤中活性碳库的积累.

土壤有机碳的累积矿化量均呈上升的趋势, 但随时间的推移有逐渐变慢的趋势, 35℃ 较明显, 这可能是因为随着培养时间的推进, 土壤中可利用的碳源成为微生物活动的限制因素, 使得土壤微生物活性下降, 从而土壤有机碳的累积矿化量也会随之减缓. 15℃ 和 25℃ 下的累积矿化量可能是由于温度较低, 培养时间较短, 趋势不明显. 在本研究中, 土壤有机碳累积矿化量由高到低顺序为:  $\text{CM} > \text{SC} > \text{SM} > \text{CK}$ , 其主要原因在于秸秆还田后进入土壤, 在微生物的分解作用下土壤有机碳含量升高, 并且秸秆过腹还田(CM)的土壤有机碳累积矿化量显著高于其它 2 种还田方式. 温度提高了土壤有机碳的累积矿化率, 15℃ 和 25℃ 下秸秆还田措施虽然提高了土壤有机碳累积矿化量, 但是有机碳的累积矿化率并没有提高, 而在 35℃ 下, 有机碳的累积矿化率出现提高, CM 处理的提高程度低于 SM 和 SC 处理. 与 CK 相比, CM 处理不管是在 15℃、25℃ 还是 35℃ 下, 均显示出了自身固碳的优越性.

本研究表明不同温度下土壤潜在矿化碳库  $C_0$  由高到低的顺序为: 25℃ 下  $C_0(1.497 \sim 2.252 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$  最大, 其次为 35℃ 下的  $C_0(1.416 \sim 2.084 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$ , 15℃ 下  $C_0$  最低, 为  $1.280 \sim 1.687 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 何建丽<sup>[33]</sup>对黄棕壤的

研究表明, 秸秆过腹还田可以增加土壤的潜在矿化量. 本研究 CM 的  $C_0$  明显大于其它土壤, 说明秸秆过腹还田增加了土壤有机碳潜在矿化碳库. CM 处理能有效提高土壤有机碳库周转速率, 缩短周转时间. 而 SM 和 SC 处理仅在 25℃ 表现出缩短碳周转时间的作用.

### 3.4 不同秸秆还田处理下温度、土壤有机碳组分和土壤酶活性对土壤有机碳矿化的影响

本试验中  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)酶活性对土壤有机碳累积矿化量的影响效果最为显著, 其次为温度和 DOC. 秸秆还田后可以增加土壤有机碳含量<sup>[11]</sup>, 提高易被微生物利用的有机碳组分, 促进土壤 DOC 中的胡敏酸和富里酸物质的积累, 促进微生物的代谢<sup>[13,34]</sup>, 从而影响土壤有机碳的矿化. 本试验中, 土壤有机碳累积矿化量随着温度的升高而增加, 这与林杉等<sup>[16]</sup>的结果相一致. 这是因为温度可以影响微生物的数量和酶活性<sup>[35]</sup>, 在温度较低时微生物的活性受到抑制, 土壤中的有效碳源能够满足微生物活动的需求, 此时限制有机碳矿化的因子是温度; 而随着温度的升高土壤微生物和酶的活性也随之增强, 此时土壤中的碳源成为有机碳矿化的限制性因子<sup>[16]</sup>. 因此, 温度通过影响微生物活性, 改变土壤 DOC 和酶活性, 进而影响土壤有机碳的矿化. 土壤有机碳的矿化与土壤微生物有这密切的关系, 今后应当加强对长期不同秸秆还田模式下土壤微生物群落结构的研究, 进一步深入探讨影响土壤有机碳矿化的关键因子.

## 4 结论

(1) 秸秆还田处理均显著提高了褐土土壤有机碳含量, 以 CM 处理提高幅度最大, 且碳库管理指数提升效果最显著.

(2) 长期秸秆还田处理的有机碳矿化速率均高于 CK 处理. 温度每升高 10℃, 矿化速率约提升  $7.99 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ . 不同秸秆还田处理土壤有机碳矿化速率差异顺序为:  $\text{CM} > \text{SC} > \text{SM} > \text{CK}$ .

(3) 低温(15~25℃)条件下, 秸秆过腹还田处理的温度敏感性是最低的, 最有利于碳库的积累.

(4) CM 的土壤有机碳累积矿化量显著高于其它两种还田方式. 15℃ 和 25℃ 下, 有机碳的累积矿化率小于 CK; 35℃ 下, CM 处理下有机碳的累积矿化率低于 SM 和 SC 处理.

(5) 温度、土壤中  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和 DOC 是褐土土壤有机碳矿化的主要驱动力.

### 参考文献:

[1] 李廷亮, 王宇峰, 王嘉豪, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田养

- 分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(23): 4835-4854.
- Li T L, Wang Y F, Wang J H, *et al.* Nutrient resource quantity from main grain crop straw incorporation and its enlightenment on chemical fertilizer reduction in wheat production in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(23): 4835-4854.
- [ 2 ] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(12): 2518-2525.
- Zhang P, Li H, Jia Z K, *et al.* Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of southern Ningxia, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(12): 2518-2525.
- [ 3 ] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 373-378.
- Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, *et al.* Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 373-378.
- [ 4 ] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 99-108.
- Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Straw return to rice paddy: soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(1): 99-108.
- [ 5 ] Liu S L, Huang D Y, Chen A L, *et al.* Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **184**: 51-58.
- [ 6 ] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, **53**(1): 16-27.
- Wang J Z, Lu C A, Zhang W J, *et al.* Decomposition of organic materials in cropland soils across China: a meta-analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(1): 16-27.
- [ 7 ] 吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2019, **52**(15): 2636-2645.
- Li Z Z, Liu X M, Zhong J F, *et al.* Effects of long-term fertilization on mineralization of soil organic carbon in red paddy soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(15): 2636-2645.
- [ 8 ] 曹寒冰, 谢钧宇, 刘菲, 等. 地膜覆盖麦田土壤有机碳矿化特征及其温度敏感性[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(21): 4611-4622.
- Cao H B, Xie J Y, Liu F, *et al.* Mineralization characteristics of soil organic carbon and its temperature sensitivity in wheat field under film mulching [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(21): 4611-4622.
- [ 9 ] Dhaliwal S S, Naresh R K, Gupta R K, *et al.* Effect of tillage and straw return on carbon footprints, soil organic carbon fractions and soil microbial community in different textured soils under rice-wheat rotation: a review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020, **19**(1): 103-115.
- [ 10 ] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(4): 806-809.
- Chen S H, Zhu Z L, Liu D H, *et al.* Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, **14**(4): 806-809.
- [ 11 ] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1530-1540.
- Wang S L, Wang H, Li J, *et al.* Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1530-1540.
- [ 12 ] Kan Z R, He C, Liu Q Y, *et al.* Carbon mineralization and its temperature sensitivity under no-till and straw returning in a wheat-maize cropping system [J]. *Geoderma*, 2020, **377**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114610.
- [ 13 ] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- Xu X C, Su Y R, Wang G H, *et al.* Straw returning plus nitrogen fertilizer affects the soil microbial community and organic carbon mineralization in karst farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- [ 14 ] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(9): 1705-1714.
- Wu M, Li Z P, Feng Y Z, *et al.* Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(9): 1705-1714.
- [ 15 ] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5680-5686.
- Ma X, Wei L, Tang M L, *et al.* Effects of varying long-term fertilization on organic carbon mineralization and priming effect of paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5680-5686.
- [ 16 ] 林杉, 陈涛, 赵劲松, 等. 不同培养温度下长期施肥水稻土的有机碳矿化特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(5): 1340-1348.
- Liu S, Chen T, Zhao J S, *et al.* Characteristics of soil organic carbon mineralization at different temperatures in paddy soils under long-term fertilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(5): 1340-1348.
- [ 17 ] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, **404**(6780): 858-861.
- [ 18 ] 徐虎, 蔡岸冬, 周怀平, 等. 长期秸秆还田显著降低褐土底层有机碳储量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(5): 768-776.
- Xu H, Cai A D, Zhou H P, *et al.* Long-term straw incorporation significantly reduced subsoil organic carbon stock in cinnamon soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021, **27**(5): 768-776.
- [ 19 ] 陈吉, 赵炳祥, 张佳宝, 等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究[J]. 土壤, 2009, **41**(5): 719-725.
- Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, *et al.* Research on process of fluvo-aquic soil organic carbon mineralization in initial stage of maize growth under long-term different fertilization [J]. *Soils*, 2009, **41**(5): 719-725.
- [ 20 ] 戚瑞敏. 不同施肥制度潮土有机碳矿化对温度和牛粪的响应及其机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [ 21 ] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(S2): 118-127.
- Qi R M, Zhao B Q, Li J, *et al.* Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(S2): 118-127.
- [ 22 ] 王齐齐. 长期不同培肥模式下典型潮土有机碳、氮矿化特征及

- 其驱动因素[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [23] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change [J]. *Science*, 1999, **285**(5427): 574-578.
- [24] Li C F, Yue L X, Kou Z K, *et al.* Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **119**: 31-37.
- [25] 朱敏,王兴龙,张岷,等.耕作方式与秸秆还田对川中紫土土壤碳库与玉米产量的影响[J].*华北农学报*,2017,**32**(S1): 302-307.  
Zhu M, Wang X L, Zhang D, *et al.* Influence of different tillage methods combined with straw-returning on the purple soil carbon pool in the hill in middle Sichuan and the maize yields [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, **32**(S1): 302-307.
- [26] 李雨诺.不同秸秆还田模式对小麦-玉米轮作体系土壤碳固持及作物生长的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [27] 武红亮.秸秆和养分综合管理下黑土的固碳效应及机制[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [28] 姚志霞,周怀平,解文艳,等.黄土旱塬24a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征[J].*环境科学*,2023,**44**(5): 2746-2755.  
Yao Z X, Zhou H P, Xie W Y, *et al.* Effects of 24 years different straw return on soil carbon, nitrogen, phosphorus, and extracellular enzymatic stoichiometry in dryland of the loess plateau, China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2746-2755.
- [29] 付鑫.旱作冬小麦农田秸秆覆盖的土壤生态效应及对作物产量形成的影响[D].西安:西北大学,2019.
- [30] 王兴凯,徐明岗,王小利,等.长期施肥对褐土有机碳矿化的影响[J].*河南农业科学*,2019,**48**(6): 81-86.  
Wang X K, Xu M G, Wang X L, *et al.* Effects of long-term fertilization on organic carbon mineralization of cinnamon soil [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, **48**(6): 81-86.
- [31] 郭振,王小利,段建军,等.长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J].*土壤学报*,2018,**55**(1): 225-235.  
Guo Z, Wang X L, Duan J J, *et al.* Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(1): 225-235.
- [32] 王朔林,杨艳菊,王改兰,等.长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2016,**22**(5): 1278-1285.  
Wang S L, Yang Y J, Wang G L, *et al.* Effect of long-term fertilization on organic carbon mineralization of cinnamon soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(5): 1278-1285.
- [33] 何建丽.长期秸秆还田条件下不同还田模式对新施入秸秆碳的转化及土壤碳库的影响[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [34] 罗璐,周萍,童成立,等.长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J].*环境科学*,2013,**34**(2): 692-697.  
Luo L, Zhou P, Tong C L, *et al.* Study on mechanism of SOM stabilization of paddy soils under long-term fertilizations [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 692-697.
- [35] 胡亚林,汪思龙,颜绍祖.影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J].*土壤通报*,2006,**37**(1): 170-176.  
Hu Y L, Wang S L, Yan S K. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(1): 170-176.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)