

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子茜, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝业厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响

邓旭哲^{1,2}, 韩晨^{2,3}, 薛利祥², 侯朋福^{1,2,3*}, 薛利红^{1,2,3}, 杨林章^{2,3}

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212001; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 农田是重要的陆地生态系统土壤碳库和作物生长的有机养分库。为明确气候变暖对稻麦轮作农田土壤碳库的影响, 利用田间开放式增温平台, 分析了增温、施肥和其交互作用对土壤有机碳和其活性组分的影响, 并评估了土壤碳库管理指数的变化。结果表明, 增温、施肥对土壤有机碳含量和其活性有机碳组分的影响均无显著交互作用。增温增加了土壤有机碳含量, 且总有机碳(TOC)和惰性有机碳(ROC)含量差异显著。与不增温对照相比, 增温处理的 TOC、ROC 和活性有机碳(LOC)含量分别增加了 7.72%、7.42% 和 10.11%。土壤微生物量碳(MBC)含量的增加(20.4%)和颗粒有机碳(POC)含量的降低(36.51%)可能是增温下土壤有机碳含量变化的主要原因。增温对土壤可溶性有机碳(DOC)含量无显著影响, 但显著降低了其可溶性微生物副产物组分含量(41.89%)。结果同时表明, 施肥对土壤有机碳含量均无显著影响, 但显著降低了活性碳组分的 DOC 和 POC 含量, 增加了 MBC 含量。与不施肥对照相比, 施肥处理的土壤 DOC 和 POC 含量分别降低了 35.44% 和 28.33%, MBC 含量增加了 33.38%。此外, 施肥有增加可溶性有机物中人为源腐殖质组分(5.13%)和可溶性微生物副产物组分(29.41%), 降低陆生源腐殖质组分含量(13.33%)的趋势。增温、施肥均有提高土壤碳库管理指数(CPMI)的趋势。土壤碳库指数(CPI)和碳库活性指数(LI)的增加分别是增温和施肥下 CPMI 增加的主要原因。结果说明, 气候变暖会通过改变土壤活性碳组分的改变影响土壤碳库, 且其效应不受施肥影响。

关键词: 增温; 施肥; 稻麦农田; 土壤有机碳(SOC); 碳库管理指数

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1553-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203270

Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation

DENG Xu-zhe^{1,2}, HAN Chen^{2,3}, XUE Li-xiang², HOU Peng-fu^{1,2,3*}, XUE Li-hong^{1,2,3}, YANG Lin-zhang^{2,3}

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Farmland is the important soil carbon pool of terrestrial ecosystems and organic nutrient pool for crop growth. To clarify the impact of climate warming on the soil carbon pool, this study analyzed the effects of warming and fertilization on soil organic carbon and its labile components under rice-wheat rotation using a free-air temperature increase system. The variation in soil carbon pool management index (CPMI) was also evaluated. The results showed that the combined effects of warming and fertilization on soil organic carbon content and labile organic carbon components were insignificant. Warming increased the soil organic carbon (SOC) content, and the differences between warming and the ambient control in total organic carbon (TOC) and recalcitrant organic carbon (ROC) reached a statistically significant level. Compared with those under the ambient control, the contents of TOC, ROC, and labile organic carbon (LOC) subjected to warming increased by 7.72%, 7.42%, and 10.11%, respectively. The increased microbial biomass carbon (MBC) content (20.4%) and decreased particulate organic carbon (POC) content (36.51%) may have been the main reason for the variation in SOC. Warming showed no significant effect on soil dissolved organic carbon (DOC) content, whereas it markedly reduced its soluble microbial by-product components (41.89%). The results also showed that fertilization had no significant effect on soil TOC, ROC, and LOC, but it notably reduced the contents of DOC and POC and increased the MBC content. Compared with those under the control without fertilization, the contents of DOC and POC subjected to fertilization decreased by 35.44% and 28.33%, respectively, and the MBC content increased by 33.38%. Additionally, fertilization tended to increase the anthropogenic humus component (5.13%) and soluble microbial by-product component (29.41%) in dissolved organic matter and reduce the terrestrial humus component (13.33%). Warming and fertilization both tended to improve soil CPMI. Affected by SOC and LOC, the increase in soil carbon pool index and soil lability index were the main reason for the increase in soil CPMI under warming and fertilization, respectively. Overall, the results revealed that climate warming can affect the soil carbon pool by changing soil labile carbon components, which are not affected by fertilization.

Key words: warming; fertilization; rice-wheat cropland; soil organic carbon(SOC); carbon pool management index

土壤是全球最大的陆地碳库, 在全球碳循环中发挥着重要作用^[1]。联合国粮农组织发布的全球土壤有机碳储量图表明, 仅地表 30 cm 范围内的土壤碳储量已达大气碳库的 2 倍, 约 6 800 亿 t, 其微小的变化也会对大气碳库产生巨大影响^[2,3]。一般而言, 土壤碳根据其稳定性可分为不稳定碳和稳定性碳,

而土壤碳周转和组分含量的变化必然会对土壤固碳

收稿日期: 2022-03-29; 修订日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077092)

作者简介: 邓旭哲(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态系统对气候变化的响应与适应, E-mail: dengxuzhe@126.com

* 通信作者, E-mail: pengfuhou100smby@163.com

潜力造成影响^[4]. 值得一提的是, 全球耕地面积约为 13.7 亿 hm^2 , 其有机碳储量达 1 700 亿 t, 是重要的陆地生态系统土壤碳库和作物生长的有机养分库^[5,6]. 因此, 开展农田土壤碳组分研究对评估其养分供应能力和固碳减排潜力具有重要意义.

IPCC 最新报告指出, 与 1850 ~ 1900 年相比, 2011 ~ 2020 年全球大气温度升高 1.09℃, 且未来 20 年的全球升温幅度预计将达到或超过 1.5℃^[7]. 气候变暖已成事实. 有研究指出, 增温会通过影响土壤酶活性和微生物群落组成, 加速土壤有机碳的矿化^[8]. Fang 等^[9]的研究发现增温会通过增加氧化酶活性提高真菌分解能力, 加速热带森林土壤 C 的流失. 而 Feng 等^[10]和 Cheng 等^[11]的研究均指出增温可通过增加降解复杂有机物的基因丰度降低土壤有机碳库稳定性, 加剧草原土壤 C 流失. 此外, Zhao 等^[12]通过模型模拟提出, 气候变暖会降低冻土区表层土壤的有机碳含量和固碳能力. 上述研究表明, 增温可能会通过影响土壤有机碳的矿化和分解等, 对土壤碳库产生影响. 然而, 土壤有机碳不同组分对温度的响应并不一致. Chen 等^[13]的研究发现, 增温处理降低了高寒草地土壤有机碳中的不稳定组分. 这说明, 增温下土壤有机碳库稳定性和土壤碳组分变化密切相关, 这些变化也必然会深刻影响土壤有机碳的存量和稳定性, 特别是不稳定碳组分 (如 DOM). 但目前的相关研究多集中在森林、草地和高原冻土地带, 在农田土壤有机碳组分对增温响应方面的研究鲜见报道.

稻麦轮作是我国重要的种植制度, 主要分布在长江中下游地区, 其种植面积达 1 300 万 hm^2 ^[14]. 化学肥料特别是氮肥的投入对提高作物产量, 保障国家粮食安全发挥了重要作用. 但有研究表明, 施肥会通过改变土壤团聚体的分布和稳定性, 影响土壤有机碳含量^[15]. 此外, 有研究指出, 施肥会改变土壤有机碳的化学组成, 对其稳定性产生影响^[16]. 在此背景下, 土壤有机碳含量和其活性组分对增温的响应是否受施肥影响不得而知, 特别是在周年高强度化肥投入和频繁的水旱轮作种植体系下.

为此, 本研究假设增温会在施肥的共同影响下加速农田土壤有机碳的周转, 改变土壤有机碳组分, 影响其潜在的固碳减排效益. 为回答这一问题, 明确增温、施肥和其交互作用对土壤有机碳含量和其活性组分变化的影响, 本研究对连续进行了 3 个周年开放式增温试验的稻麦轮作农田土壤进行采样分析, 定量分析了土壤有机碳含量和其活性组分的变化, 并定性分析了土壤溶解性有机物 (DOM) 的三维荧光特性. 在此基础上, 选择碳库管理指数 (CPMI),

对增温施肥的土壤碳库变化进行了估算评价, 以期气候变暖背景下农田土壤碳库的响应特征解析和固碳减排策略的制定提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在江苏省南京市江宁区汤山街道阜庄村稻麦轮作农田进行, 试验区属亚热带季风气候, 年平均降水量 1 106.5 mm, 年平均气温 15.4℃. 田间开放式增温试验平台 (FATE) 于 2018 年 6 月水稻种植前建立, 并连续运行, 运行期间水稻生长季冠层和土壤温度平均增加约 1.0℃ 和 0.9℃, 小麦生长季冠层和土壤温度平均增加约 1.1℃ 和 1.37℃. 供试土壤为马肝土, 试验开始前土壤理化性状为: pH 5.93, ω (有机质) 29.22 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (全氮) 1.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (有效磷) 6.87 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (速效钾) 83.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

本试验采用裂区设计, 增温处理 (ET) 和不增温对照 (AT) 为主区, 每个处理 3 次重复, 共 6 个小区 (每个小区面积为 7 m × 6 m). 利用红外加热装置对 ET 处理样地进行增温, 每小区有效增温面积 3.6 m^2 . 为维持和 ET 小区加热装置相同的遮荫效果, AT 对照小区安装无加热功能的相同模拟装置, 并和 ET 小区一致, 随作物生长动态调整装置高度使其保持与冠层距离不变 (约 80 cm). 所有小区稻麦两季肥料运筹一致. 其中, 稻季氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 肥用量分别为 270、108 和 216 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥和钾肥采用过磷酸钙和氯化钾一次性基施, 氮肥采用尿素, 分基肥 (35%)、分蘖肥 (30%) 和穗肥 (35%) 3 次施用; 麦季氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 肥用量分别为 240、96 和 96 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥和钾肥一次性基施, 氮肥分基肥 (40%)、越冬肥 (30%) 和拔节孕穗肥 (30%) 3 次施用.

为明确土壤有机碳含量和其活性组分对增温的响应是否受施肥影响, 于 2020 年 6 月水稻季开始增加施肥处理 (CF) 和不施肥对照 (CK) 副区. 其中, 施肥处理的肥料用量和运筹保持不变; 不施肥对照为 0.25 m^2 的田间微区, 磷、钾肥用量和运筹与 CF 处理一致, 不施氮肥.

1.2 样品测定项目和方法

于增温试验第 3 年水稻收获后 (2021 年 10 月) 采用 5 点法采集田间不同处理的土壤样品分析土壤碳组分含量. 土壤样品采回后, 进行预处理, 剔除土样中石砾、植物残体等杂质. 将预处理后的土样分两部分, 一部分储存于 4℃ 冰箱中用于土壤微生物量碳 (MBC) 的测定, 一部分风干后分别过 10 目和

100 目筛用于土壤其它碳组分指标的测定。

土壤总有机碳(TOC)用元素分析仪测定;土壤可溶性有机碳(DOC)用去离子水提取后用 TOC 仪测定;土壤活性有机碳(LOC)用 KMnO_4 氧化法测定^[17];土壤颗粒有机碳(POC)用偏六磷酸钠分离法测定^[18];MBC 用氯仿熏蒸提取法测定^[19]。

土壤溶解性有机物(DOM)的三维荧光分析采用 FluoroLog-3 型荧光光谱仪,以氙灯为激发源,可见光 PMT-980 为发射源,测定样品的 EEM 光谱。激发波长为 250 ~ 450 nm,发射波长为 250 ~ 550 nm。激发和发射扫描间隔设置为 5 nm,狭缝宽度均设置为 5 nm。在样品分析之前,检测超纯水的空白 EEM 光谱,并对每个样品进行 3 次扫描。

在荧光光谱数据分析之前进行预处理,包括 Milli-Q 水间隙推导、拉曼校正和散射校正,并将预处理后的数据上传至 Open Fluor 荧光光谱共享数据库平台,与已有研究结果中荧光组分进行比对,鉴别荧光组分。

1.3 土壤碳库管理指数的计算

根据 Blair 等^[20]的方法,以不施氮肥-不增温处理作为参照进行土壤碳库管理指数计算,相关计算公式如下:

碳库指数(CPI) = 样品土壤有机碳含量/对照土壤有机碳含量

碳库活度(L) = 样品活性有机碳含量/惰性有机碳含量(总有机碳 - 活性有机碳)

碳库活度指数(LI) = 样品碳库活度/对照碳库活度

碳库管理指数(CPMI) = 碳库指数(CPI) × 碳库活度指数(LI) × 100

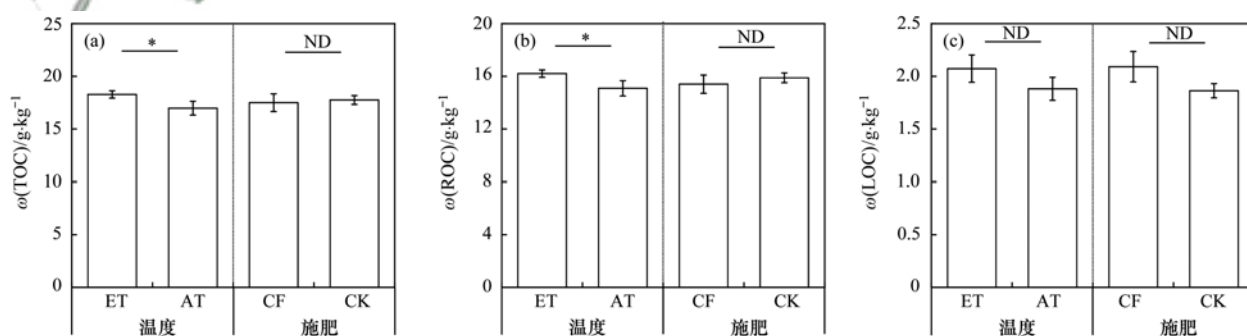
1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,使用 SPSS 25.0 软件分析施肥和温度对变量的影响效应和交互显著性,若交互效应显著,采用 Duncan 法对所有处理进行两两比较,并计算各指标的平均值和标准误。使用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 增温施肥对土壤有机碳含量的影响

因子分析结果表明,增温、施肥对土壤总有机碳(TOC)、惰性有机碳(ROC)和活性有机碳(LOC)含量的影响均无显著交互作用(表 1)。增温显著影响土壤 TOC 和 ROC 含量($P < 0.05$)。与不增温对照(AT)相比,增温处理(ET)的土壤 TOC 和 ROC 含量分别增加 7.72% 和 7.42% (图 1)。此外,ET 处理较 AT 对照同时增加了土壤 LOC 含量(10.11%),但差异未达到显著水平($P > 0.05$)。结果同时表明,施肥对土壤 TOC、ROC 和 LOC 含量均无显著影响。施肥处理(CF)的土壤 TOC 含量与不施肥对照(CK)相当,但有降低 ROC 含量、增加 LOC 含量的趋势。结果说明,增温对土壤有机碳库的影响效应高于施肥处理,且土壤有机碳库对增温的响应不受施肥影响。



ET:增温,AT:不增温,CF:施肥,CK:不施肥,TOC:总有机碳,ROC:惰性有机碳,LOC:活性有机碳; *: $P < 0.05$, ND: $P > 0.05$

图 1 增温施肥对土壤有机碳含量的影响

Fig. 1 Effect of warming and fertilization on soil organic carbon content

2.2 增温施肥对土壤活性有机碳组分的影响

为明确增温、施肥和二者交互作用对土壤活性有机碳含量的影响,本研究同时分析了土壤可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)和微生物量碳(MBC)含量的变化。结果表明,土壤活性有机碳组分对增温和施肥的响应不同,但增温和施肥对 3 种土壤活性有机碳组分的影响均无显著交互作用(表 1)。增温对土壤 DOC 含量无显著影响,但显著影响土壤 POC 和 MBC 含量($P < 0.01$)。与不增温对照

(AT)相比,增温处理(ET)增加了土壤 MBC 含量(20.4%),降低了土壤 POC 含量(36.51%) (图 2)。结果同时表明,施肥对 3 种活性有机碳组分含量均有显著影响($P < 0.01$)。与不施肥对照(CK)相比,施肥处理(CF)降低了土壤 DOC (35.44%) 和 POC 含量(28.33%),增加了土壤 MBC 含量(33.38%)。

2.3 土壤 DOM 的三维荧光特性分析

不同处理下土壤溶解性有机物(DOM)的三维荧光特性分析结果见图 3。结果表明,本研究中不同

表 1 增温施肥对土壤有机碳和其活性组分影响的因子效应分析¹⁾

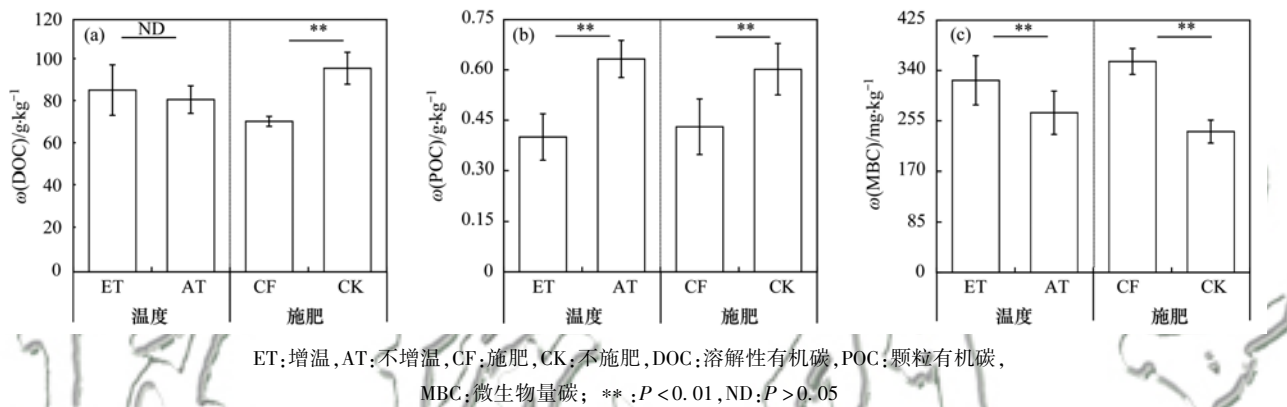
Table 1 Factor analysis for the effect of warming and fertilization on soil organic carbon and its labile components

因子	T	N	T × N
TOC	5.44 *	ND	ND
ROC	5.78 *	ND	ND
LOC	ND	ND	ND
DOC	ND	18.80 **	ND
POC	44.73 **	24.56 **	ND
MBC	19.30 **	90.41 **	ND
人为源腐殖质	ND	ND	ND
陆生源腐殖质	ND	ND	ND
可溶性微生物副产物	11.84 **	ND	ND

1) T: 温度; N: 施肥; *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ND: $P > 0.05$

处理的土壤样品均同时检出 3 种有机组分. 为便于分析, 以 OpenFluor 数据库和其他三维荧光相关文献为参考, 对 3 种荧光组分进行了比对 (表 2). 结果发现, 测试土壤检出的 3 种荧光组分 (C1、C2 和 C3) 均为腐殖酸类组分, 但其种类不同, 分别为: 人为源腐殖质组分 (C1)、陆生源腐殖质组分 (C2) 和可溶性微生物副产物组分 (C3).

各组分含量的因子分析结果表明, 增温和施肥对 3 种 DOM 荧光组分含量 (C1、C2 和 C3) 的影响均无显著交互效应 (表 1). 增温处理 (ET) 的 3 种荧光组分含量分别较不增温对照 (AT) 降低了 7.32% (C1)、6.90% (C2) 和 41.89% (C3), 且 C3 组分含量的差异显著 ($P < 0.05$, 图 4). 此外, 施肥有增加



ET: 增温, AT: 不增温, CF: 施肥, CK: 不施肥, DOC: 溶解性有机碳, POC: 颗粒有机碳, MBC: 微生物量碳; **: $P < 0.01$, ND: $P > 0.05$

图 2 增温施肥对土壤活性有机碳组分的影响

Fig. 2 Effects of warming and fertilization on soil labile carbon components

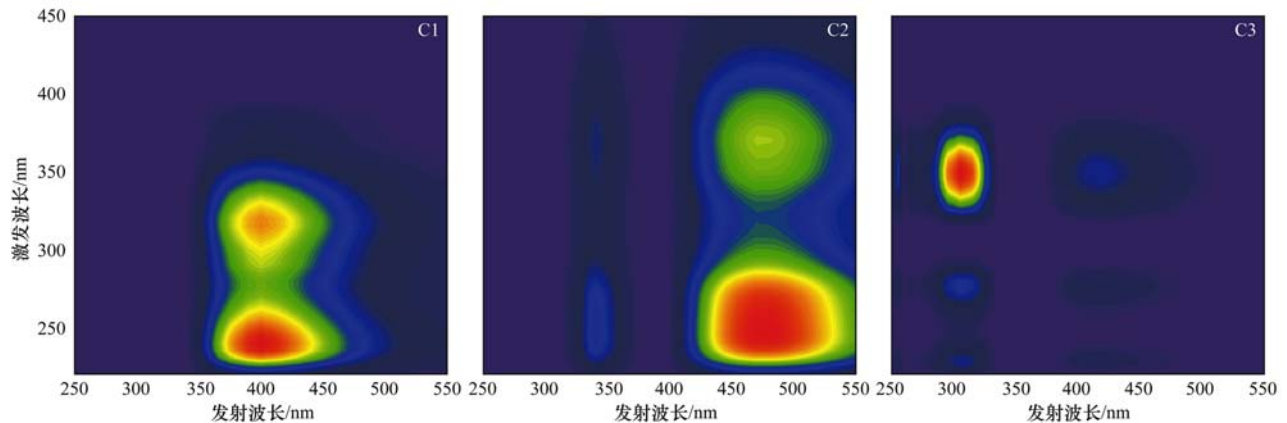


图 3 土壤 DOM 三维荧光特征光谱

Fig. 3 Characteristic spectra of soil DOM 3-dimensional

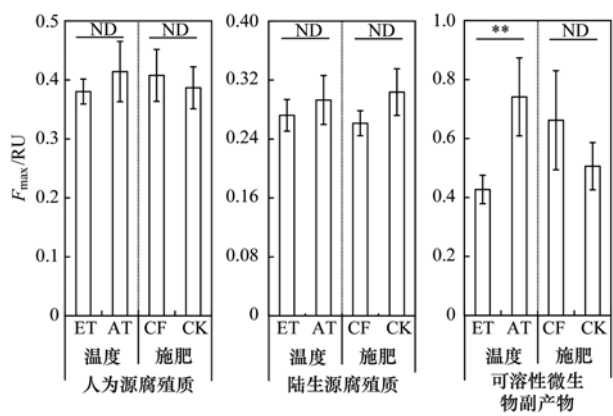
表 2 土壤 DOM 三维荧光组分比对结果

Table 2 Comparison results of soil DOM 3-dimensional fluorescence components

本试验荧光组分	激发波长 (E_x)/nm	发射波长 (E_m)/nm	识别组分	文献
C1	230 ~ 250	400 ~ 410	人为源腐殖质	[21]
C2	330 ~ 340	460 ~ 480	陆生源腐殖质	[22]
C3	340 ~ 360	290 ~ 310	可溶性微生物副产物	[23]

C1 和 C3 组分, 降低 C2 组分含量的趋势, 但差异均未达显著水平.

2.4 增温施肥对碳管理指数的影响
为系统评价增温施肥对土壤碳库的影响, 进一



ET:增温,AT:不增温,CF:施肥,CK:不施肥;
**: $P < 0.01$, ND: $P > 0.05$

图4 增温施肥对土壤DOM荧光组分含量的影响

Fig. 4 Effects of warming and fertilization on the contents of soil DOM fluorescent components

步对不同处理的土壤碳库管理指数进行了分析(表3). 结果表明,增温与施肥对土壤碳库指数(CPI)、碳库活度(L)、碳库活度指数(LI)和碳库管理指数(CPMI)的影响均无显著交互作用. ET处理较AT对照显著增加了土壤CPI($P < 0.05$),但 L 和LI数值与AT对照相当. 此外,CF处理的CPI和 L 与CK对照相当,但有增加LI的趋势,但差异均未达到显著水平. 受CPI和LI变化影响,增温和施肥均有增加土壤CPMI的趋势.

2.5 土壤DOM组分、有机碳含量和土壤碳库管理指数的相关性分析

土壤DOM组分、有机碳含量和土壤碳库管理指数的相关性分析如图5所示. 结果表明,土壤DOM组分间均呈正相关关系,其中C1组分与C2组分和C3组分间相关性均达到显著水平,但C2组分

表3 增温施肥对土壤碳库管理指数的影响¹⁾

Table 3 Effect of warming and fertilization on soil carbon pool management index

处理		碳库指数 (GPI)	碳库活度 (L)	碳库活度指数 (LI)	碳库管理指数 (CPMI)
温度(T)	ET	1.63 ± 0.03	0.13 ± 0.01	1.32 ± 0.11	215.03 ± 15.34
	AT	1.52 ± 0.06	0.13 ± 0.01	1.30 ± 0.15	194.92 ± 13.99
施肥(N)	CF	1.56 ± 0.08	0.14 ± 0.01	1.41 ± 0.15	218.78 ± 17.34
	CK	1.59 ± 0.04	0.12 ± 0.01	1.21 ± 0.05	191.18 ± 7.67
F 值	T	5.55 *	ND	ND	ND
	N	ND	ND	ND	ND
	$T \times N$	ND	ND	ND	ND

1) ET:增温,AT:不增温,CF:施肥,CK:不施肥; *: $P < 0.05$; ND: $P > 0.05$

与C3组分间相关性不显著. 此外,土壤活性有机碳LOC含量与颗粒有机碳POC含量呈显著负相关关系,与土壤MBC含量显著正相关;而土壤MBC含量与POC、DOC含量显著负相关;此外,惰性有机碳ROC与DOM的C3组分呈极显著负相关关系. 结果同时表明,土壤碳库指数CPI与土壤总有机碳TOC含量极显著正相关,但与碳库活度 L 和碳库活度指数LI显著负相关;而碳库管理指数CPMI与LOC、MBC和POC分别呈极显著正相关和显著负相关关系,并与 L 和LI极显著正相关.

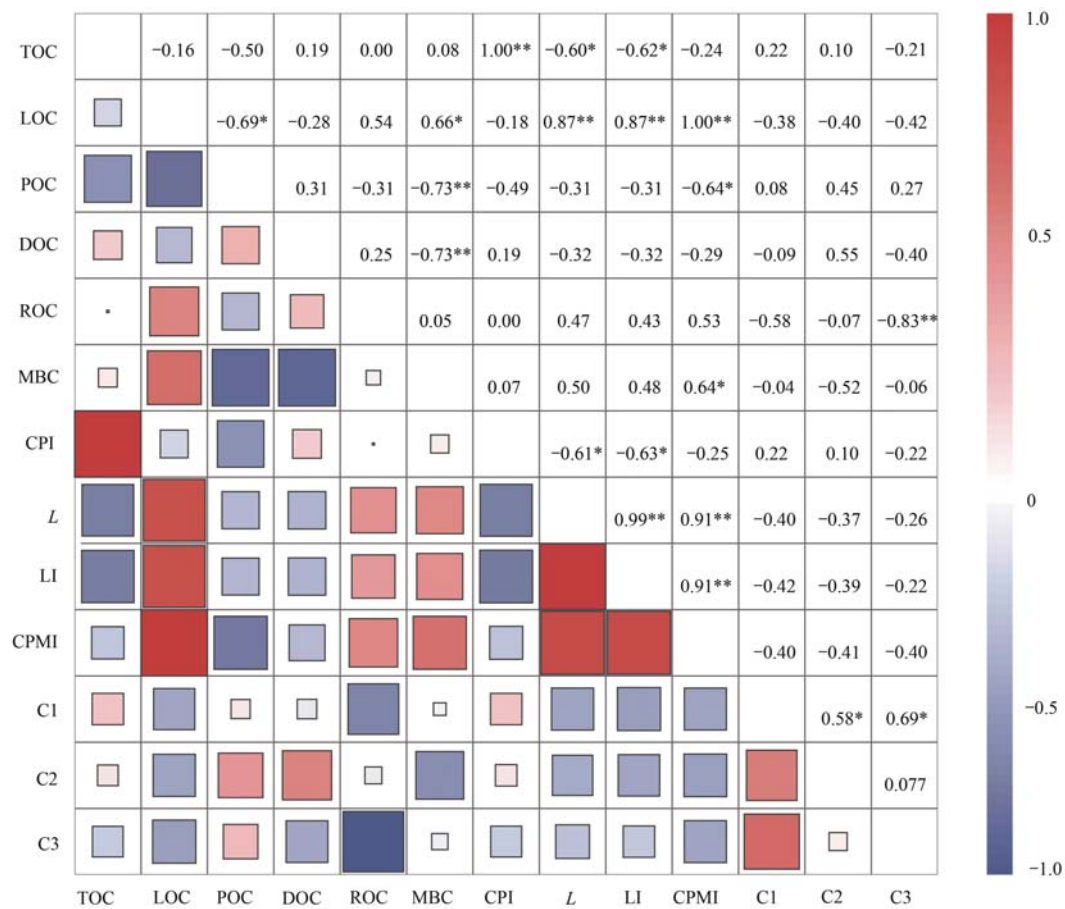
3 讨论

3.1 增温施肥对土壤有机碳含量的影响

土壤活性有机碳(LOC)和惰性有机碳(ROC)共同组成了土壤的有机碳库(TOC)^[24]. Zhou等^[25]的研究表明,增温会增加草地土壤ROC含量,但对LOC含量无显著影响. 本研究发现,增温、施肥对土壤TOC、ROC和LOC含量的影响均无显著交互作用. 增温是影响土壤有机碳含量的主要因子($P < 0.05$). 与不增温对照相比,增温显著增加了土壤

TOC含量,且ROC含量的显著增加是TOC含量变化的主要原因. 此外,增温下土壤LOC含量也表现为增加趋势. 课题组前期研究发现,尽管增温处理对水稻产量无显著影响,但会增加水稻生育前期的无效分蘖(数据未列出). 该部分无效分蘖死亡后的残体进入土壤分解转化为土壤可利用养分可能是TOC含量增加的主要原因. 此外,有研究表明,增温会加速作物残茬的分解,同时促进土壤活性有机碳组分和惰性有机碳组分的积累,但土壤呼吸过程中易被分解组分会优先被土壤微生物利用,这将使更多稳定且不易分解的组分保留在土壤中^[26,27]. 这说明增温下作物无效分蘖残体的C输入和不同组分的分解差异可能是土壤有机碳含量增加的主要原因,ROC含量的增加效应高于LOC含量^[28].

施肥是提高土壤肥力、保证作物养分供应,提高作物生产力的重要手段^[29]. 本研究发现,施肥对土壤TOC、LOC和ROC含量均无显著影响,但有降低ROC含量、增加LOC含量的趋势. 土壤有机碳的积累主要源于微生物活动,而植物残体为其提供了必要的底物^[30]. 有研究表明,施肥可以通过提高作



TOC:总有机碳,ROC:惰性有机碳,LOC:活性有机碳,DOC:溶解性有机碳,POC:颗粒有机碳,MBC:微生物量碳,CPI:土壤碳库指数,L:碳库活度,LI:碳库活度指数,CPMI:碳库管理指数;*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

图5 土壤 DOM 组分、有机碳含量和土壤碳库管理指数的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil DOM component, soil organic carbon, and soil carbon pool management index

物生物量,使进入土壤的作物残体增多,这将导致土壤微生物群落结构发生改变,激活原本处于休眠状态的微生物群落(“激发”效应),加速新鲜有机质的分解^[31].此外,有研究表明,这种“激发”效应可能会加速土壤固有惰性有机碳组分的分解^[32].这可能是施肥下土壤有机碳含量变化的主要原因.值得注意的是,土壤有机碳含量对温度的响应不受施肥影响.这说明,温度变化引起的作物残体碳输入和土壤碳周转差异可能高于并掩盖施肥带来的影响.

3.2 增温施肥对土壤活性有机碳组分的影响

本研究发现,与土壤有机碳响应一致,增温和施肥对土壤活性有机碳组分的影响均无显著交互作用.与不增温相比,增温对土壤 DOC 含量无显著影响,但显著增加了土壤 MBC 含量,降低了土壤 POC 含量.前述指出,增温会通过促进无效分蘖提高作物残茬输入量,增加土壤有机碳含量. Peplau 等^[33]的研究指出,增温会增加微生物生物量,并提高微生物的代谢活动加速土壤 POC 的分解和损失.此外,有研究表明,增温会促进 POC 中植物源土壤有机碳向微生物源的转化,增加土壤 MBC 含量^[33,34].本研究

相关性分析结果表明,土壤活性有机碳 LOC 含量与颗粒有机碳 POC 含量呈显著负相关关系,与土壤 MBC 含量显著正相关.这说明,土壤 MBC 含量的增加和 POC 含量的降低可能是土壤有机碳含量变化的主要原因.增温不仅会通过促进微生物活性,增加 MBC 含量提高土壤 LOC 含量^[35,36],还可能同时通过对微生物活性的影响,加速土壤原有活性碳组分向更稳定碳的转化^[37,38].

尽管增温对土壤 DOC 含量无显著影响,但 DOM 三维荧光分析结果表明,增温显著降低了土壤 DOM 中的可溶性微生物副产物组分.此外,相关性分析结果表明,土壤 ROC 含量与可溶性微生物副产物组分极显著负相关.有研究证实,增温能够提高土壤真菌群落的相对优势,而土壤真菌较其他类型微生物在土壤碳周转中具有较高的碳同化率和较低的副产物产量(可溶性微生物碳组分)^[39,40].因此,增温下土壤微生物群落的差异可能是 DOM 中可溶性微生物副产物组分降低的主要原因,且其较高的碳同化率可能是土壤 MBC 含量增加的原因之一.结果说明,尽管增温对土壤 DOC 含量无显著影响,但其

组分变化和其在土壤碳周转中的效应值得关注。

本研究还发现, 尽管施肥对土壤 TOC、LOC 和 ROC 含量无显著影响, 但不同活性有机碳组分对施肥的响应不尽一致。与不施肥对照相比, 施肥显著降低了土壤 DOC 和 POC 含量, 增加了土壤 MBC 含量。有研究表明, 施肥会增加土壤盐分, 促使微生物吸收利用土壤活性有机碳组分以维持自身渗透压的平衡^[41]。此外, 如前所述, 施肥可以通过提高土壤微生物生物量, 改变微生物群落组成, 促进其对土壤活性有机碳组分的利用, 增加土壤 MBC 含量^[42]。DOM 三维荧光分析也表明, 施肥有增加 DOM 中人为源腐殖质组分和可溶性微生物副产物组分, 降低陆生源腐殖质组分含量的趋势。这说明, 施肥可能通过增加作物残茬和根系分泌物归还量、提高微生物活性^[43,44], 增加人为源 C1 和微生物源 C3 组分含量, 但会降低陆源输入的 C 组分(C2)。因此, 施肥对作物生长的促进效应和土壤微生物群落的改变可能是土壤活性有机碳响应差异的主要原因, 并进一步影响其养分供应能力和固碳减排潜力。

3.3 增温对土壤碳库管理指数影响

土壤 CPMI 是量化土壤有机碳库质量, 反映土壤养分供应能力和土壤碳库动态变化的重要指标^[45]。为更好地评价增温施肥对土壤碳库的影响, 本研究分析了增温、施肥和其交互效应对土壤碳库管理指数的影响。本研究发现, 增温和施肥对 CPI、L、LI 和 CPMI 的影响均无显著交互作用, 但增温显著增加了土壤 CPI, 而施肥处理较不施肥对照有增加土壤 LI 的趋势。受增温下 CPI 和施肥下 LI 变化影响, 增温和施肥均提高了土壤 CPMI。相关性分析结果表明(图 5), 土壤 CPI 与 TOC 含量极显著正相关, CPMI 和 LOC、MBC 和 POC 分别呈极显著正相关和显著负相关关系。结果说明, 增温施肥对土壤有机碳含量和活性有机碳组分的影响会直接或间接对土壤碳库管理指数产生影响, 不同情境下 CPMI 的响应原因不能一概而论。

4 结论

(1) 增温和施肥对土壤有机碳含量和活性有机碳组分的影响均无显著交互作用。增温增加了土壤 TOC、ROC 和 LOC 含量, 且 TOC 和 ROC 含量差异显著; 而施肥对土壤有机碳含量无显著影响。

(2) 增温显著增加了土壤 MBC 含量, 降低了土壤 POC 含量, 是土壤有机碳含量变化的主要原因。此外, 增温对土壤 DOC 含量无显著影响, 但显著降低了其可溶性微生物副产物组分。

(3) 施肥显著降低了土壤 DOC 和 POC 含量, 增

加了土壤 MBC 含量。此外, 施肥有增加 DOM 中人为源腐殖质组分和可溶性微生物副产物组分, 降低陆生源腐殖质组分含量的趋势。

(4) 增温和施肥对土壤碳库管理指数的影响无显著交互作用, 受增温下 CPI 和施肥下 LI 对土壤有机碳和活性碳组分响应变化影响, 增温和施肥均提高了土壤 CPMI。

参考文献:

- [1] Rocci K S, Lavalley J M, Stewart C E, *et al.* Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148569.
- [2] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, *et al.* Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, **5**(1): 81-91.
- [3] Evans C D, Williamson J M, Kacaribu F, *et al.* Rates and spatial variability of peat subsidence in acacia plantation and forest landscapes in Sumatra, Indonesia[J]. *Geoderma*, 2019, **338**: 410-421.
- [4] 郑聚锋, 陈硕桐. 土壤有机质与土壤固碳[J]. *科学*, 2021, **73**(6): 13-17.
Zheng J F, Chen S T. Soil organic matter and soil carbon sequestration[J]. *Science*, 2021, **73**(6): 13-17.
- [5] 赵荣钦. 农田生态系统碳源/汇的时空差异及增汇技术研究——以中国沿海地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2004.
Zhao R Q. Research on the temporal-spatial differences of carbon sources and sinks of farmland ecosystems and the techniques to sequester carbon—a case study of China coastal regions[D]. Kaifeng: Henan University, 2004.
- [6] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(6): 131-137.
Guan Y, Yu W T, Li J D. Effects of long-term fertilization on soil nutrient pool[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(6): 131-137.
- [7] IPCC, Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R]. Geneva: International Panel on Climate Change, 2018.
- [8] Li X J, Xie J S, Zhang Q F, *et al.* Substrate availability and soil microbes drive temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization to warming along an elevation gradient in subtropical Asia[J]. *Geoderma*, 2020, **364**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114198.
- [9] Fang X, Zhou G Y, Qu C, *et al.* Translocating subtropical forest soils to a warmer region alters microbial communities and increases the decomposition of mineral-associated organic carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107707.
- [10] Feng W T, Liang J Y, Hale L E, *et al.* Enhanced decomposition of stable soil organic carbon and microbial catabolic potentials by long-term field warming[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(11): 4765-4776.
- [11] Cheng L, Zhang N F, Yuan M T, *et al.* Warming enhances old organic carbon decomposition through altering functional microbial

- communities[J]. The ISME Journal, 2017, **11** (8): 1825-1835.
- [12] Zhao D S, Zhu Y, Wu S H, *et al.* Simulated response of soil organic carbon density to climate change in the northern tibet permafrost region[J]. Geoderma, 2022, **405**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115455.
- [13] Chen Q Y, Niu B, Hu Y L, *et al.* Warming and increased precipitation indirectly affect the composition and turnover of labile-fraction soil organic matter by directly affecting vegetation and microorganisms [J]. Science of the Total Environment, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136787.
- [14] Sheng R, Meng D L, Wu M N, *et al.* Effect of agricultural land use change on community composition of bacteria and ammonia oxidizers[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13** (7): 1246-1256.
- [15] 徐曼, 余砾, 王富华, 等. 紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J]. 环境科学, 2021, **42** (11): 5491-5499.
- Xu M, Yu L, Wang F H, *et al.* Response of soil organic carbon content in different slope positions to fertilization management in purple soil sloping fields[J]. Environmental Science, 2021, **42** (11): 5491-5499.
- [16] Li Z Q, Zhao B Z, Wang Q Y, *et al.* Differences in chemical composition of soil organic carbon resulting from long-term fertilization strategies[J]. PLoS One, 2015, **10** (4), doi: 10.1371/journal.pone.0124359.
- [17] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, **155** (1): 399-402.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58** (1): 123-130.
- [19] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [20] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46** (7): 1459-1466.
- [21] Bagtho S A, Sharma S K, Amy G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC [J]. Water Research, 2011, **45** (2): 797-809.
- [22] Kim J, Kim Y, Sung E P, *et al.* Impact of aquaculture on distribution of dissolved organic matter in coastal Jeju Island, Korea, based on absorption and fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29** (1): 553-563.
- [23] Zhou J, Wang J J, Baudon A, *et al.* Improved fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for fluorescent dissolved organic matter [J]. Journal of Environment Quality, 2013, **42** (3): 925-930.
- [24] Senesi N, Miano T M, Provenzano M R, *et al.* Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy [J]. Soil Science, 1991, **152** (4): 259-271.
- [25] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, *et al.* Warming rather than increased precipitation increases soil recalcitrant organic carbon in a semiarid grassland after 6 years of treatments [J]. PLoS One, 2013, **8** (1), doi: 10.1371/journal.pone.0053761.
- [26] Romero-Olivares A L, Allison S D, Treseder K K. Decomposition of recalcitrant carbon under experimental warming in boreal forest[J]. PLoS One, 2017, **12** (6), doi: 10.1371/journal.pone.0179674.
- [27] 邓明位, 张思佳, 朱波, 等. 猪厩肥和秸秆还田对紫色土有机碳组分及稳定性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, **39** (2): 205-211.
- Deng M W, Zhang S J, Zhu B, *et al.* Effects of pig manure and corn residue on the organic carbon fractions and stability of purple soil[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, **39** (2): 205-211.
- [28] Mandal B, Majumder B, Adhya T K, *et al.* Potential of double-cropped rice ecology to conserve organic carbon under subtropical climate[J]. Global Change Biology, 2008, **14** (9): 2139-2151.
- [29] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 王子芳. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2020, **41** (4): 1921-1929.
- Zhu H Y, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. Environmental Science, 2020, **41** (4): 1921-1929.
- [30] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35** (6): 837-843.
- [31] De Nobili M, Contin M, Mondini C, *et al.* Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33** (9): 1163-1170.
- [32] Zhou S, Lin J J, Wang P, *et al.* Resistant soil organic carbon is more vulnerable to priming by root exudate fractions than relatively active soil organic carbon[J]. Plant and Soil, 2022, doi: 10.1007/s11104-021-05288-y.
- [33] Peplau T, Schroeder J, Gregorich E, *et al.* Long-term geothermal warming reduced stocks of carbon but not nitrogen in a subarctic forest soil [J]. Global Change Biology, 2021, **27** (20): 5341-5355.
- [34] Ofiti N O E, Zosso C U, Soong J L, *et al.* Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108185.
- [35] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, **43** (4): 2219-2225.
- Lin S F, Wang X L, Duan J J, *et al.* Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on organic carbon mineralization and active organic carbon in dryland yellow soil[J]. Environmental Science, 2022, **43** (4): 2219-2225.
- [36] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, *et al.* Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice [J]. Soil and Tillage Research, 2012, **124**: 119-130.
- [37] 张春霞, 郝明德, 谢佰承. 不同化肥用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2006, **37** (5): 861-864.
- Zhang C X, Hao M D, Xie B C. Effect of application amounts of different chemical fertilizers on soil carbon pool [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, **37** (5): 861-864.
- [38] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, **29** (2): 406-413.
- Su Z X, Su B Q, Shanguan Z P. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29** (2): 406-

- 413.
- [39] Peleato N M, Sidhu B S, Legge R L, *et al.* Investigation of ozone and peroxone impacts on natural organic matter character and biofiltration performance using fluorescence spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2017, **172**: 225-233.
- [40] Li D T, Cheng Y Q, Li T L, *et al.* Co-application of biogas slurry and hydrothermal carbonization aqueous phase substitutes urea as the nitrogen fertilizer and mitigates ammonia volatilization from paddy soil[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117340.
- [41] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, *et al.* Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(4): 543-550.
- [42] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 357-380.
- [43] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, *et al.* Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2009, **314**(1): 67-76.
- [44] 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 等. 长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 521-529.
- Wu C X, Gao X F, Yan B S, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil nutrient characteristics and microbial resource restrictions in a terrace on the loess plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 521-529.
- [45] 王栋, 李辉信, 李小红, 等. 覆草旱作对稻田土壤活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(1): 75-83.
- Wang D, Li H X, Li X H, *et al.* Soil labile organic carbon as affected by non-flooded rice cultivation with straw mulching under different tillages[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(1): 75-83.



CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)