

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征

王季斐^{1,2}, 童瑶瑶^{1,2}, 祝贞科², 陈珊^{2,3}, 邓扬悟^{1*}, 葛体达², 吴金水²

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州 341000; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

摘要: 外源碳会改变土壤有机质的转化以及土壤微生物的活性, 不同水平的易利用有机碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征尚不明确. 为阐释外源碳周转过程中的微生物响应特征, 选取葡萄糖为典型易利用外源碳, 采用¹³C稳定同位素标记技术, 在室内模拟培养实验, 基于土壤微生物生物量碳(MBC)设置不同水平葡萄糖碳(0 × MBC、0.5 × MBC、1 × MBC、3 × MBC和5 × MBC共5个MBC倍数梯度水平), 明确其转化与分配规律; 并利用96微孔酶标板荧光分析法, 测定参与土壤碳转化过程关键酶纤维二糖水解酶(CBH)和β-葡萄糖苷酶(β-Glu)活性. 结果表明, 培养2 d时, 葡萄糖碳(¹³C)占可溶性有机碳(¹³C-DOC)和土壤有机碳(¹³C-SOC)的比例与其添加量成显著正相关; 向¹³C-MBC的分配在3 × MBC处理时达到最大值(18.96 mg·kg⁻¹), 随后降低; ¹³C分配率主要与MBC、Olsen-P和DOC存在显著正相关关系. 60 d时, 土壤¹³C-DOC、¹³C-MBC和¹³C-SOC显著下降, 分别小于或等于0.02、2和10 mg·kg⁻¹; 与CK相比, 添加葡萄糖后CBH酶活性显著提高, 其中3 × MBC处理提高了22.6倍, 显著高于其它处理($P < 0.05$); 高量葡萄糖(3 × MBC和5 × MBC)添加促进了β-Glu酶活性, 但促进效果随葡萄糖添加量的增加而减少; NH₄⁺-N、pH、β-Glu和CBH成为¹³C分配率的主要影响因子. 综上, 外源碳向土壤有机碳的转化随添加量的增加而增加, 改变了土壤酶活性, 但微生物对外源碳的利用可能存在一个饱和阈值, 饱和阈值之内, 有机质的转化速率与添加量成正比; 超出饱和阈值, 有机质的转化速率反而变慢. 因此, 适量地添加外源碳有利于提高稻田土壤有机碳, 优化作物生长环境质量.

关键词: 稻田土壤; 碳转化; 外源碳; 微生物响应; 土壤酶活性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0970-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806204

Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil

WANG Ji-fei^{1,2}, TONG Yao-yao^{1,2}, ZHU Zhen-ke², CHEN Shan^{2,3}, DENG Yang-wu^{1*}, GE Ti-da², WU Jin-shui²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The turnover of soil organic carbon (SOC) and the activity of soil microbes can be influenced by exogenous carbon. However, microbial response characteristics of the transformation and distribution of available organic carbon under different levels remain unclear in paddy soils. ¹³C-labeled glucose was used as a typical available exogenous carbon to simulate indoor culture experiments added at different levels of soil microbial biomass carbon (MBC) (0 × MBC, 0.5 × MBC, 1 × MBC, 3 × MBC, and 5 × MBC) to reveal the process of C-transformation and distribution. The characteristics of microbial response in the process of exogenous carbon turnover was also monitored. The 96-well microplate fluorescence analysis was adopted to determine the activities of cellobiose hydrolase (CBH) and β-glucosidase (β-Glu). The results showed that, in 2 d of incubation, the ratio of labeled glucose carbon to dissolved organic carbon (¹³C-DOC/DOC) or to SOC (¹³C-SOC/SOC) was positively correlated with the amount of glucose added. The incorporation of glucose C (¹³C) into MBC reached the highest value (18.96 mg·kg⁻¹) at 3 × MBC treatment but decreased thereafter. The ¹³C allocation rate was mainly positively correlated with MBC, Olsen-P, and DOC. At 60 d, ¹³C-DOC, ¹³C-MBC, and ¹³C-SOC decreased significantly to less than 0.02 mg·kg⁻¹, 2 mg·kg⁻¹, and 10 mg·kg⁻¹ in soil, and it was positively correlated with the amount of glucose added. Compared with CK, CBH enzyme activity increased significantly after the addition of glucose, and for the 3 × MBC treatment it was increased by 22.6 times, which was significantly higher than those of other treatments ($P < 0.05$). However, β-Glu enzyme activity increased only in the 3 × MBC and 5 × MBC treatments, wherein it decreased with increasing amounts of added

收稿日期: 2018-06-25; 修订日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51564023); 江西省自然科学基金项目(20114BAB213019); 江西省科技支撑计划项目(20151BBG70005); 江西理工大学2018年研究生创新基金项目

作者简介: 王季斐(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态技术与工程, E-mail: wangjifei0529@sina.cn

* 通信作者, E-mail: tosang@foxmail.com

glucose. NH_4^+-N , pH, $\beta\text{-Glu}$, and CBH were the primary factors affecting the distribution rate of ^{13}C . In conclusion, the conversion of exogenous carbon to SOC increased with increased amounts of added organic carbon. This changed the activity of soil enzymes; however, microbial utilization of exogenous carbon may have a saturation threshold. Within the saturation threshold, the conversion rate of organic matter was directly proportional to the amount of added organic matter. When the saturation threshold was exceeded, the conversion rate of organic matter decreased. Therefore, the appropriate addition of exogenous carbon is beneficial, as it can increase SOC in rice fields and improve the quality of the crop growth environment.

Key words: paddy soil; carbon conversion; exogenous carbon; microbial response; soil enzyme activity

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库, 对气候变化和陆地生态系统碳循环有重要的影响^[1, 2]. 因此, 碳库的演变已经成为研究土壤有机碳的热点领域^[3]. 据报道, 稻田有机碳积累对我国农田土壤固碳的贡献达 70% ~ 74%^[4], 近 30 年数据表明, 我国亚热带稻田土壤具有持续固碳的功能, 其有机碳的动态变化对整个亚热带地区的碳平衡意义重大. 土壤中有有机碳的积累是长期的, 要在短期内检测到碳库的显著差异较为困难^[5], 但是通过模拟实验在短时间内研究土壤碳库的动态变化, 对于理解土壤碳循环的生物地球化学过程具有重要意义^[2]. 已有大量研究通过外源添加不同类型的外源碳研究其在土壤中的周转过程, 如葡萄糖^[6]、纤维素^[7]等简单碳化合物以及有机肥^[8]、秸秆^[9]等复杂有机碳. 土壤有机碳转化过程是土壤循环的最基本过程^[10], 探索外源易利用有机碳在稻田土壤中的转化、分配过程, 系统科学地管理外源碳向土壤有机碳库的输入, 对于提高稻田土壤碳储存具有重要意义.

易利用有机碳在土壤碳库的周转过程中具有关键的作用^[6]. 由于微生物的存在, 外源碳的量和土壤中新增加的碳量并不相等^[11]. 外源碳的种类^[11]和添加水平^[12]是影响土壤碳形态转化的重要因素. Fontaine 等^[7]将 ^{13}C 标记的纤维素添加到草地后导致土壤总 SOC 含量降低, SOC 矿化排放 CO_2 的速率增加, 且非标记碳源是其主要来源. 田慎重等^[13]的研究得出, 在小麦的不同生育期, 秸秆还田使土壤 SOC 提高, 其中表层土壤(0 ~ 10cm)的提高幅度最显著. 综上可知, 各实验所得的碳源可利用性高低对土壤有机碳的影响随着实验环境以及碳源自身的不同而各有差异. 根际沉积是稻田土壤有机碳的重要来源, 对于维持稻田土壤碳平衡有着重要的作用^[14]. Yevdokimov 等^[15]认为根际沉积物更易被微生物利用代谢. 葡萄糖是根系分泌物中的简单碳水化合物, 约占总碳的 32%^[16], 同时是可直接被微生物利用的碳. 土壤微生物碳量(MBC)是土壤演化的一个非常重要的指标. Blagodatskaya 等^[17]发现外源添加碳数量高于、等于和低于 MBC 量对土壤微生物活性的影响不同, 并提出计算土壤 C 底物时应该考虑土壤微生物量 C 值. 因此, 以葡萄糖为典型

外源有机碳, 研究其在土壤中转化与分配规律尤其是微生物酶学响应特征, 对于理解稻田土壤外源有机碳的周转过程具有重要意义.

土壤微生物是土壤碳循环过程中关键的驱动者和调节者^[18]. 微生物可调节所分泌的生态酶比例, 进而获取自身所需的元素^[10]. 外源碳输入土壤后为微生物提供了一个良好的土壤环境, 微生物为适应这个新环境会分泌微生物酶来促进土壤有机质和外源碳之间的共代谢作用^[19]. β -葡萄糖苷酶($\beta\text{-Glu}$)是土壤多糖分解酶系中主要的一种, 可将多糖分解为单糖^[20], 纤维二糖水解酶(CBH)是纤维素类酶, 其活性可以反映土壤有机碳分解转化的规律^[21]. 荣勤雷等^[22]的研究发现有机肥对土壤酶活性有很大的影响, 例如 $\beta\text{-Glu}$ 酶得到提高, 进而加快土壤有机碳的转化. 本实验通过对 CBH 和 $\beta\text{-Glu}$ 两种土壤微生物酶活性的动态变化的研究, 探讨外源碳输入土壤时微生物对土壤碳转化的响应.

因此, 本研究选择 ^{13}C -葡萄糖作为稻田土壤典型易利用态外源有机碳, 基于土壤 MBC 量进行梯度添加, 分析不同有机碳供应水平条件下微生物对有机碳的分解转化与碳固持规律及其微生物酶学响应特征, 对于提高稻田土壤碳储存具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为多年种植水稻的典型红壤, 采集于中国科学院长沙农业环境观测研究站(113°19'52"E, 28°33'04"N), 该地属亚热带季风湿润气候, 平均气温 16 ~ 18℃, 年降雨量 1 200 ~ 1 700 mm, 无霜期 260 ~ 310 d, 年降雨量 1 200 ~ 1 700 mm. 采集耕作层(0 ~ 20 cm)土壤, 除去土壤可见植物残体(如根、茎和叶)、石块以及土壤动物等可见杂质, 土壤自然风干后过 2 mm 筛, 测定基本理化性质^[23]. 供试土壤基本理化性质见表 1.

1.2 实验设计

以葡萄糖(3.0% atom ^{13}C)为碳源, 采用室内培养实验, 设置 5 个不同的 C 添加量水平: ① 0% MBC (0 × MBC); ② 50% MBC (0.5 × MBC); ③ 100% MBC (1 × MBC); ④ 300% MBC (3 ×

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of the test soil												
项目	黏粒 /%	砂粒 /%	粉粒 /%	pH 值	有机碳 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	C/N	Olsen-P /mg·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	DOC /mg·kg ⁻¹	MBC /mg·kg ⁻¹
参数	14.05	6.72	79.23	6.00	18.63	126.05	10.17	47.48	0.301	1.64	29.74	867.31

MBC); ⑤500% MBC(5 × MBC).

实验设计处理为: (A) 土(干土计 200 g) + ①(CK); (B) 土 + ②; (C) 土 + ③; (D) 土 + ④; (E) 土 + ⑤, 每个处理 3 个平行.

1.3 测试指标与方法

土壤 pH 采用 Mettler-toledo320 pH 计(FE20K, 瑞士)测定(水:土=2.5:1); 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)采用碳氮元素分析仪(Vario MAX C/N, 德国)测定(干烧法); 土壤速效磷(Olsen-P)采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定^[24]; 土壤机械组成采用激光粒度仪测定; NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 采用流动注射仪(Fiastar 5000, 瑞典福斯)测定; 生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸提取-碳自动分析法测定^[25, 26]; 土壤溶解性有机碳(DOC)采用有机碳分析仪(岛津 Vwp, 日本)测定; 参与土壤碳转化的纤维二糖水解酶(CBH)和β-葡萄糖苷酶(β-Glu)酶活性采用 96 微孔酶标板荧光分析法测定^[27].

1.4 数据处理和统计分析

本实验所得数据采用 Origin 8.5 和 SPSS 18.0 进行处理和分析, 采用 One-way ANOVA(单因素方差分析)进行显著性检验, 采用 Duncan 法进行多重比较,

用 Canoco 5 进行 RDA(冗余分析)和方差分析.

2 结果与分析

2.1 土壤溶液和土壤中¹³C在不同碳库中的动态变化

外源碳输入影响了土壤中各形态碳的动态变化. 土壤及其溶液中的¹³C-DOC和¹³C-SOC在培养初期随添加量的增加显著梯度增加(图 1), 培养后期均降低, 且与外源碳添加量成正相关. ¹³C-MBC在培养初期随添加量的增加表现为先增加后减少的趋势, 60 d 后与¹³C-DOC变化趋势一致. 土壤及其溶液中的¹³C-DOC和土壤¹³C-SOC含量在 2 d 培养时, 与 C 添加量成正比, 培养 60 d 时, 土壤溶液和土壤中¹³C-DOC分别降低至 0.1 mg·L⁻¹和 0.02 mg·kg⁻¹以下, 土壤¹³C-SOC降低至 10 mg·kg⁻¹, 与外源碳添加量成正相关[图 1(a)、1(b)和 1(d)]. 培养 2 d 时, ¹³C-MBC 含量在 3 × MBC 处理存在最大值 18.96 mg·kg⁻¹, 60 d 培养时均低于 2 mg·kg⁻¹, 与¹³C-DOC变化趋势一致[图 1(c)].

2.2 ¹³C-葡萄糖的转化与分配规律

通过比较¹³C在培养 2 d 和 60 d 时的分配率, 可揭示外源碳在稻田土壤中的转化与分配规律. 培养

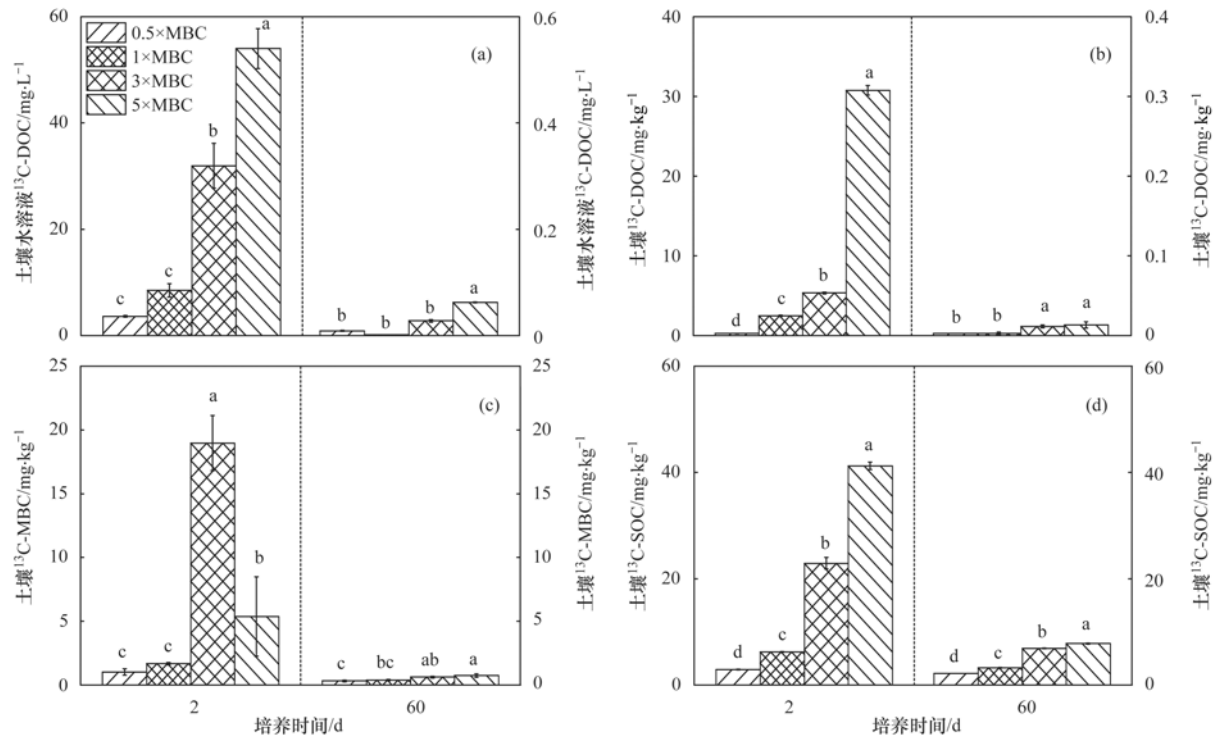


图 1 不同 C 添加量下¹³C在土壤溶液和土壤中的动态变化

Fig. 1 Effects of soil and soil solution ¹³C under varying amounts of carbon addition

初期, 土壤水溶液 ^{13}C -DOC分配率受葡萄糖添加量影响不显著[图2(a)]; 随着葡萄糖添加量的增大, 土壤 ^{13}C -DOC和 ^{13}C -SOC的分配率呈增长趋势[图2(b)和2(d)]; ^{13}C -MBC分配率先增后减[图2(c)], 在 $3 \times \text{MBC}$ 处理存在最大值35.2% [图2(c)]. 与

培养初期相比, 培养60 d时, 各有机碳组分中 ^{13}C 分配率均降低, ^{13}C -DOC的分配率几乎为0, 土壤 ^{13}C -MBC和 ^{13}C -SOC的分配率与外源碳添加量呈显著梯度降低($P < 0.01$), ^{13}C -MBC分配率低于4%, ^{13}C -SOC分配率则大于10% [图2(c)和2(d)].

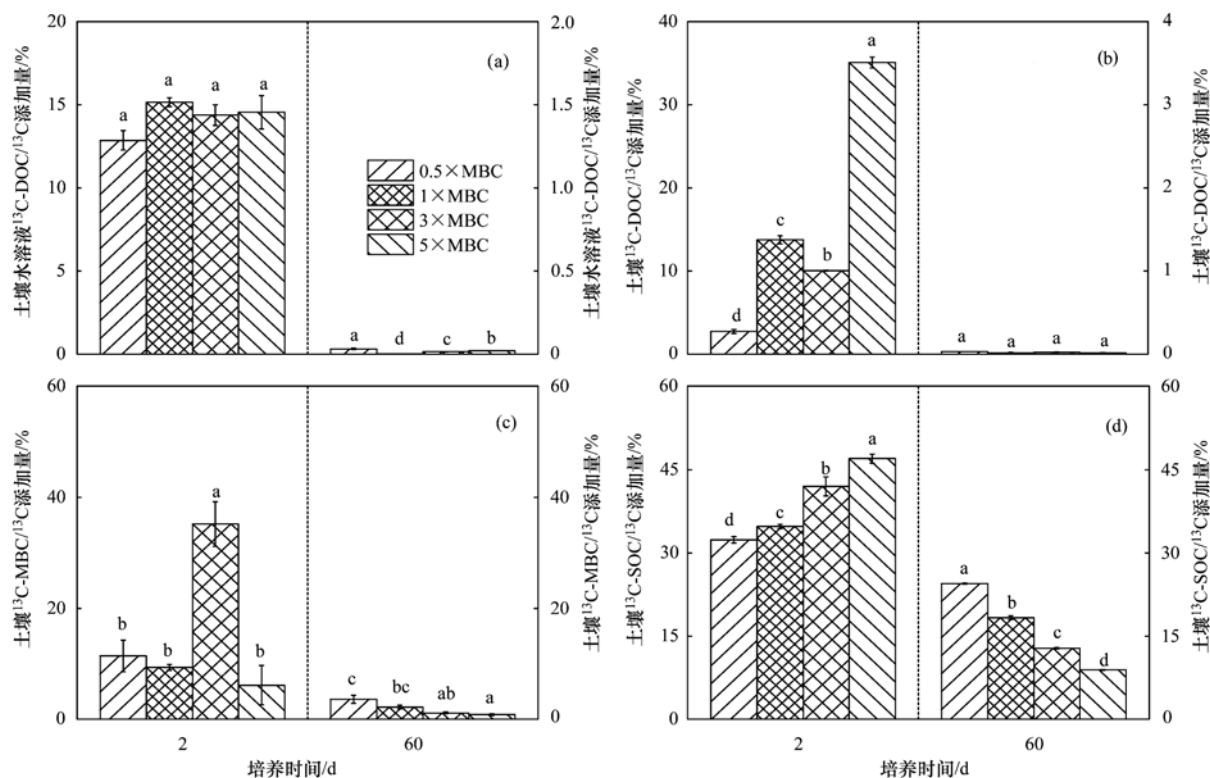


图2 不同C添加量下土壤 ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC和 ^{13}C -SOC分配率

Fig. 2 Recovery of soil ^{13}C -DOC, ^{13}C -MBC, and ^{13}C -SOC under varying amounts of carbon addition

2.3 土壤中不同碳库之间的相互关系

对不同培养时期的土壤DOC、MBC、SOC、 ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC和 ^{13}C -SOC进行了相关性分析(表2和表3), 在培养2 d时, ^{13}C -DOC与 ^{13}C -SOC、DOC和SOC之间呈极显著正相关($P < 0.01$), ^{13}C -SOC与DOC和SOC呈极显著正相关($P < 0.01$). 培养60 d时, ^{13}C -DOC与 ^{13}C -SOC呈极显著正相关($P < 0.01$), 与MBC呈极显著负相关($R = -0.798$, $P < 0.01$), ^{13}C -MBC与 ^{13}C -SOC呈极显著正相关($P < 0.01$), ^{13}C -SOC与MBC呈极显著负相关($R = -0.796$, $P < 0.01$).

土壤C添加量和培养时间对SOC、MBC、DOC、 ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC和 ^{13}C -SOC的转化存在影响, 通过多重比较分析发现, ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC、 ^{13}C -SOC和DOC均与土壤C添加量和培养时间以及其交互作用存在极显著关系(表4).

2.4 不同外源有机碳添加水平下土壤酶活变化特征

外源碳的输入水平影响土壤C周转酶活性大小(图3). 与CK相比, 外源碳的添加使培养初期CBH活性降低了 $4.9 \sim 6.5 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 但在培养后期, 其CBH活性增大了 $0.3 \sim 5.3 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 在 $3 \times \text{MBC}$ 处理存在最高值

表2 培养2 d土壤 ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC、 ^{13}C -SOC、DOC、MBC和SOC的Pearson相关分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis of soil ^{13}C -DOC, ^{13}C -MBC, ^{13}C -SOC, DOC, MBC, and SOC after 2 d of incubation

	^{13}C -DOC	^{13}C -MBC	^{13}C -SOC	DOC	MBC	SOC
^{13}C -DOC	1	—	—	—	—	—
^{13}C -MBC	0.003	1	—	—	—	—
^{13}C -SOC	0.931 **	0.358	1	—	—	—
DOC	0.954 **	0.294	0.997 **	1	—	—
MBC	0.201	0.021	0.152	0.157	1	—
SOC	0.767 **	0.39	0.877 **	0.862 **	0.046	1

5.47 nmol·(g·h)⁻¹, 是 CK 组的 23 倍, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$). 培养初期, β -Glu 活性随着 C 添加量的增加而逐渐减少, 培养后期 3 × MBC 和 5 × MBC 处理的酶活性分别增大了 28.7 nmol·(g·h)⁻¹ 和 9.3 nmol·(g·h)⁻¹ [3 × MBC 处理为最高值 54.502 nmol·(g·h)⁻¹], 其他两个处理分别降低了 22.0 nmol·(g·h)⁻¹ 和 20.5 nmol·(g·h)⁻¹.

表 3 培养 60 d 土壤¹³C-DOC、¹³C-MBC、¹³C-SOC、DOC、MBC 和 SOC 的 Pearson 相关分析¹⁾

	¹³ C-DOC	¹³ C-MBC	¹³ C-SOC	DOC	MBC	SOC
¹³ C-DOC	1	—	—	—	—	—
¹³ C-MBC	0.655 *	1	—	—	—	—
¹³ C-SOC	0.913 **	0.835 **	1	—	—	—
DOC	0.635 *	0.523	0.668 *	1	—	—
MBC	-0.798 **	-0.418	-0.796 **	-0.793 **	1	—
SOC	0.578 *	0.418	0.587 *	0.566	-0.671 *	1

表 4 C 添加量和培养时间对土壤 SOC、MBC、DOC、¹³C-DOC、¹³C-MBC 和 ¹³C-SOC 量的多重比较¹⁾

	DOC		MBC		SOC		¹³ C-DOC		¹³ C-MBC		¹³ C-SOC	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
C 添加量	3 563.33	0.00 **	0.19	0.899	18.83	0.00 **	6 356.22	0.00 **	30.27	0.00 **	3 552.25	0.00 **
培养时间	11 195.56	0.00 **	14.58	0.002 *	73.45	0.00 **	11 787.44	0.00 **	56.77	0.00 **	6 083.02	0.00 **
C 添加量 × 培养时间	3 476.37	0.00 **	0.53	0.667	7.01	0.03 *	6 346.26	0.00 **	29.34	0.00 **	1 969.77	0.00 **

1) * 为在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关, ** 为在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

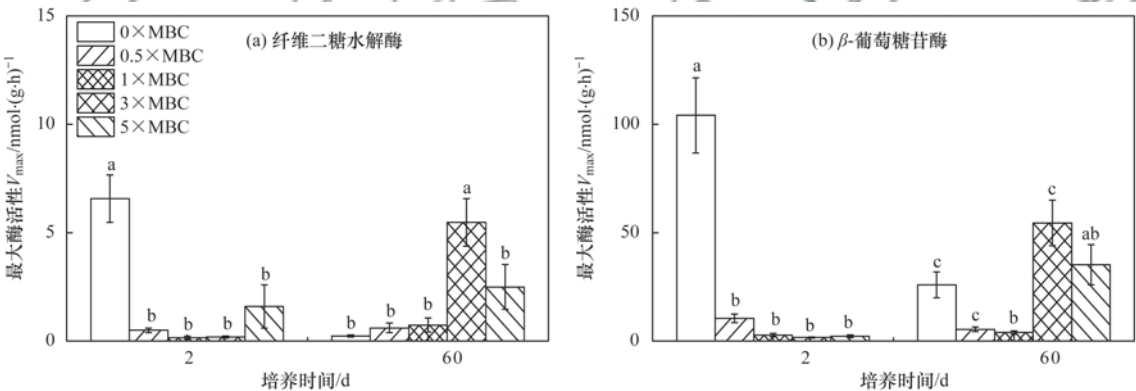


图 3 纤维二糖水解酶和 β -葡萄糖苷酶的最大活性潜势 ($V_{\max}$)

Fig. 3 Maximum enzyme activity potential ($V_{\max}$) of cellobiose hydrolase (CBH) and β -glucosidase (β -Glu)

2.5 理化性质对¹³C分配率的影响

对影响土壤¹³C分配率的主要因子进行了 RDA 分析 (图 4). 各指标对土壤¹³C-DOC、¹³C-MBC 和¹³C-SOC 的累计解释率分别为 63.63%、82.18% 和 85.15%. 在培养初期, ¹³C 分配率主要受到 MBC、Olsen-P 和 DOC 的影响, 其中 DOC 的影响最显著. 培养 60 d 时, NH₄⁺-N、pH、 β -Glu 和 CBH 成为主要影响因子, 其中, pH 对¹³C-DOC 和¹³C-MBC 影响最显著, NH₄⁺-N 对¹³C-SOC 的影响显著.

3 讨论

3.1 不同外源碳有机输入水平条件下土壤有机碳的转化与分配特征

碳源是土壤微生物生长代谢的重要限制因素,

外源碳添加到稻田土壤后, 显著改变了各形态碳在土壤中的分配. 由于葡萄糖吸附性较差, 葡萄糖-C 输入土壤后, 主要以易被微生物利用可溶性碳形式存在于土壤水溶液中, 随着土壤微生物对 C 的利用转化为 MBC 或可能以矿物结合态固存于土壤中^[28,29], 很少部分以葡萄糖形式存在于土壤中. 本实验培养初期, 由于微生物对葡萄糖利用非常快, 在前期完成了同化, ¹³C-MBC 和¹³C-SOC 在短时间内增加, 但¹³C-MBC 含量并没有与外源添加量成正比, 而是增加到最大值后开始下降, 这可能是因为, 外源碳转化为微生物量碳可能存在一个饱和阈值, 饱和阈值之内, 有机质的转化速率与添加量成正比; 超出饱和阈值, 有机质的转化速率反而变慢. 微生物对外源碳的利用有限, 小于等于 3 × MBC 添加量

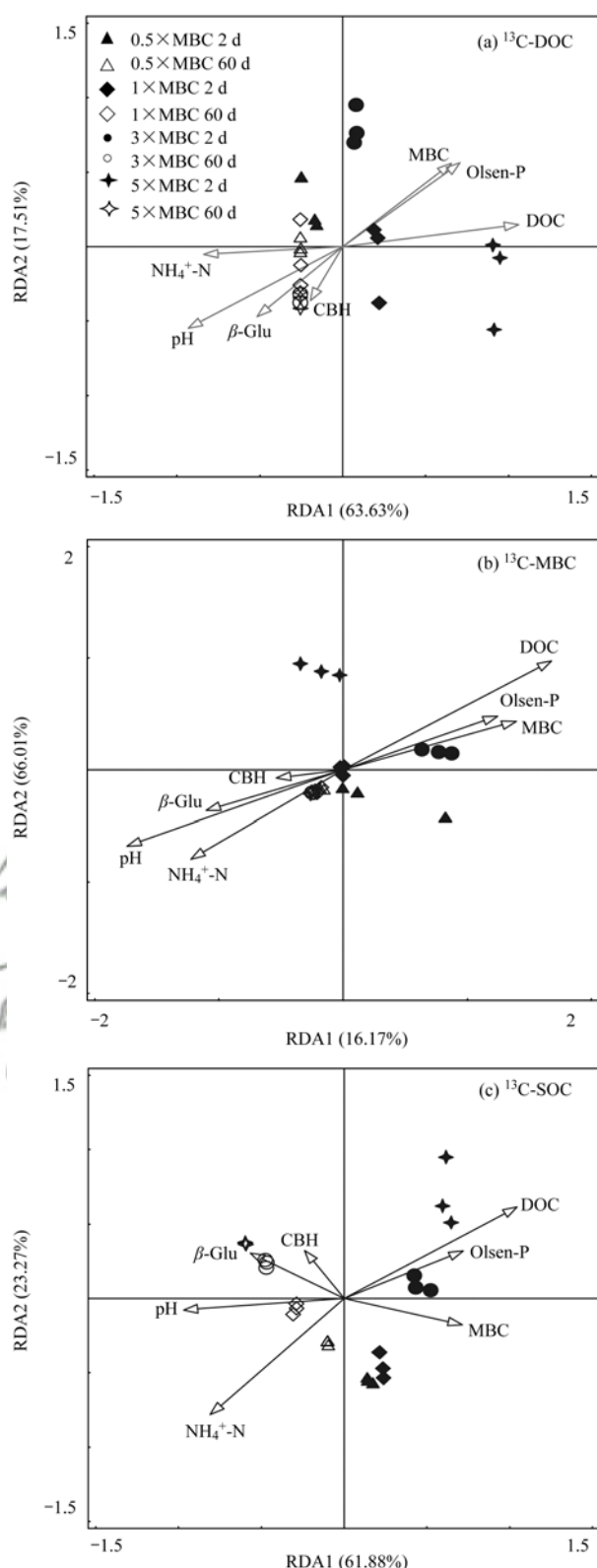
图4 影响 ^{13}C -DOC、 ^{13}C -MBC和 ^{13}C -SOC因素的 RDA 分析

Fig. 4 RDA of influencing factors on ^{13}C -DOC, ^{13}C -MBC, and ^{13}C -SOC

时, 外源碳主要用于微生物生长, MBC 含量与外源碳添加量呈正相关; 而 $5 \times \text{MBC}$ 添加量输入外源碳远超出微生物生长繁殖的需求, 从而出现负激发效应^[30], 导致 MBC 含量下降. 同时, 超出饱和阈值, 土壤 C 大幅度增加, 由于土壤碳循环受其他养分因

素(如 N)计量比的影响, MBC 的转化速率变慢^[10], 当外源碳大量添加使 C/N 比大幅度增加, 导致 C/N 比失衡, 由于微生物胞外物质, 如多糖的 C/N 比要远大于胞内物质, 为了实现胞内养分均衡, 微生物把大量碳源转化为胞外物质或是以气体形式释放^[31, 32], 从而减少了 MBC 的生成量, 因此, 土壤中 ^{13}C -MBC 含量在 $3 \times \text{MBC}$ 添加量时达到最大值, 之后有所下降. 而 ^{13}C -DOC 和 ^{13}C -SOC 量与外源碳添加量呈正相关. 培养 60 d 时, 由于微生物分解利用, 各碳库中外源碳含量存在显著的差异. 水溶液及土壤中 ^{13}C -DOC 含量几乎为零, ^{13}C -MBC 和 ^{13}C -SOC 含量也有所降低, 但仍与外源碳添加量呈正相关, 这是由于外源碳的添加促进了微生物的活性^[33], 葡萄糖由于微生物利用, 变成代谢产物以及存在于死亡细胞中, ^{13}C 进一步成为底物, 被呼吸消耗, 以 CO_2 和 CH_4 的形式释放到大气中^[28], 由于外源碳逐渐消耗, C/N 比达到平衡, ^{13}C -MBC 量与外源碳添加量呈正相关. 土壤中 ^{13}C 在各碳库的分配率 $\text{SOC} > \text{MBC} > \text{DOC}$, ^{13}C -SOC 分配率大于 10%, 这可能是因为 MBC 和 DOC 为易被利用的碳库, 相较于 SOC 易被微生物分解利用, 输入的外源碳随着微生物的分解利用, 以 SOC 的形式固存于土壤中, 还有一部分 ^{13}C 分配到了其他碳库中, 以 CH_4 和 CO_2 的形式释放进入大气碳库.

3.2 土壤碳转化的微生物响应特征

酶是有机质转化的主要介导物质^[20]. 土壤中的微生物酶活性会随着外源碳的输入发生变化. 培养初期, 葡萄糖添加导致 β -葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶活性明显降低, 且与葡萄糖添加量呈负相关, 这可能是因为两种酶的主要功能均为水解有机碳, 将难利用的复杂多糖降解为易利用的单糖, 其大量分泌是碳源不足的象征, 外源葡萄糖以易分解的单糖形式进入土壤中被微生物利用, 微生物碳限制被解除, 进而减少两种酶的分泌, 与 DOC 的结果相一致. 葡萄糖添加量对两种酶的活性有显著影响, 可能是由于微生物碳需求的饱和所致. 培养 60 d 时, CBH 和 $\beta\text{-Glu}$ 酶活性在 $0 \times \text{MBC}$ 、 $0.5 \times \text{MBC}$ 和 $1 \times \text{MBC}$ 这 3 个处理中较低, 可能是由于长期能量供应不足, 导致微生物整体活性下降, 酶分泌量减少, ^{13}C -DOC 含量一定程度上可以佐证该推断; $3 \times \text{MBC}$ 处理中, 酶活升高, 可能是由于外源碳的添加提供了微生物生长所需要的能源, 群落结构发生改变, 其大量繁殖, 导致 C 需求增大, 从而引起酶活性升高; $5 \times \text{MBC}$ 处理酶活反而减小, 可能是因为微生物可直接利用的葡萄糖较为充足, 后期碳源限制小于 $3 \times \text{MBC}$ 处理.

4 结论

(1) 外源葡萄糖碳的输入使得土壤 CBH 和 β -Glu 活性初期降低, 后期增加。

(2) 微生物将外源碳转化为微生物量碳可能存在于一个饱和阈值, 饱和阈值之内, 有机质的转化速率与添加量成正比; 超出饱和阈值, 有机质的转化变慢。

参考文献:

- [1] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, *et al.* Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, **5**(1): 81-91.
- [2] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(4): 1075-1081.
Wang Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(4): 1075-1081.
- [3] 胡乃娟, 张四伟, 杨敏芳, 等. 秸秆还田与耕作方式对稻麦轮作农田土壤碳库及结构的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, **36**(4): 7-12.
Hu N J, Zhang S W, Yang M F, *et al.* Effects of different tillage and straw return on soil carbon pool and soil structure under rice-wheat rotation system [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, **36**(4): 7-12.
- [4] Huang Y, Sun W. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(15): 1785-803.
- [5] Bolinder M A, Angers D A, Gregorich E G, *et al.* The response of soil quality indicators to conservation management [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, **79**(1): 37-45.
- [6] 汤珍珠, 祝贞科, 沈冰洁, 等. 养分化学计量比对稻田土壤葡萄糖矿化及其激发效应的影响[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(1): 246-254.
Tang Z Z, Zhu Z K, Shen B J, *et al.* Effect of stoichiometric ratio of soil nutrients on mineralization and priming effect of glucose in paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(1): 246-254.
- [7] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, *et al.* Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(4): 314-320.
- [8] Tenuta M, Mkhabela M, Tremorin D, *et al.* Nitrous oxide and methane emission from a coarse-textured grassland soil receiving hog slurry[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **138**(1-2): 35-43.
- [9] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, *et al.* Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
- [10] 吴金水, 葛体达, 祝贞科. 稻田土壤碳循环关键微生物过程的计量学调控机制探讨[J]. *地球科学进展*, 2015, **30**(9): 1006-1017.
Wu J S, Ge T D, Zhu Z K. Discussion on the key microbial process of carbon cycle and stoichiometric regulation mechanisms in paddy soils[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, **30**(9): 1006-1017.
- [11] 周文杰, 张鹏, 秦嗣军, 等. 添加葡萄糖和淀粉对盆栽甜樱桃根区土壤碳代谢及根功能的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(11): 3300-3308.
Zhou W J, Zhang P, Qin S J, *et al.* Effects of exogenous glucose and starch on soil carbon metabolism of root zone and root function in potted sweet Cherry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(11): 3300-3308.
- [12] Tian Q X, Yang X L, Wang X G, *et al.* Microbial community mediated response of organic carbon mineralization to labile carbon and nitrogen addition in topsoil and subsoil [J]. *Biogeochemistry*, 2016, **128**(1-2): 125-139.
- [13] 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.
- [14] 祝贞科, 沈冰洁, 葛体达, 等. 农田作物同化碳输入与周转的生物地球化学过程[J]. *生态学报*, 2016, **36**(19): 5987-5997.
Zhu Z K, Shen B J, Ge T D, *et al.* Biogeochemical processes underlying the input and turnover of crop assimilative carbon in farmland ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(17): 5987-5997.
- [15] Yevdokimov I, Ruser R, Buegger F, *et al.* Microbial immobilisation of ^{13}C rhizodeposits in rhizosphere and root-free soil under continuous ^{13}C labelling of oats[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(6): 1202-1211.
- [16] Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition—an important source for carbon turnover in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(4): 397-407.
- [17] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, **45**(2): 115-131.
- [18] 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J]. *生态学报*, 2017, **37**(2): 358-366.
He Y L, Qi Y C, Peng Q, *et al.* Effects of external carbon on the key processes of carbon cycle in a terrestrial ecosystem and its microbial driving mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 358-366.
- [19] 姬强. 不同耕作措施和外源碳输入对土壤结构和有机碳库的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Ji Q. Soil structure and organic carbon response to tillage practices and exogenous carbon application [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [20] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2016, **32**(4): 171-178.
Bian X L, Zhao W L, Yue Z L, *et al.* Research process of soil enzymes effect on carbon and nitrogen cycle in agricultural ecosystem[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(4): 171-178.
- [21] Zeglin L H, Stursova M, Sinsabaugh R L, *et al.* Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems[J]. *Oecologia*, 2007, **154**(2): 349-359.
- [22] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. *中植物营养与飞亮学报*, 2014, **20**(5): 1168-1177.
Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effects of different

- organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(5): 1168-1177.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Olsen S R, Cole C, Watanabe F S, *et al.* Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[M]. Washington: United States Department of Agriculture, 1954.
- [25] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [26] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [27] Loeppmann S, Blagodatskaya E, Pausch J, *et al.* Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency of exo-enzymes in rhizosphere and detritusphere [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **92**: 111-118.
- [28] 沈冰洁. 氮/磷添加对稻田土壤碳周转的生态化学计量学调控机制[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
Shen B J. Ecological stoichiometry controls upon carbon turnover in paddy soil in response to N/P addition [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [29] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(1): 104-111.
- Wang S L, Wang G L, Zhao X, *et al.* Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(1): 104-111.
- [30] Kuzyakov Y. Factors affecting rhizosphere priming effects [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(4): 382-396.
- [31] Zhu Z K, Ge T D, Luo Y, *et al.* Microbial stoichiometric flexibility regulates rice straw mineralization and its priming effect in paddy soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **121**: 67-76.
- [32] Wei X M, Su Y, Zhang H T, *et al.* Responses of methanotrophic activity, community and EPS production to CH₄ and O₂ concentrations in waste biocover soils [J]. *Waste Management*, 2015, **42**: 118-127.
- [33] 谭立敏, 吴昊, 李卉, 等. 不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C连续标记法[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1933-1938.
Tan L M, Wu H, Li H, *et al.* Input and distribution of rice photosynthesized carbon in the tillering stage under different nitrogen application following continuous ¹³C labeling [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1933-1938.



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)