E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

双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2019
Vol.40 No.3
第40卷 第3期

环 境 科 学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷 第 3 期
2019 年 3 月 15 日

目 次

2014 ~ 2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估 …… 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞(1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响 …… 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王垚, 何迪, 权维俊, 马志强(1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 来源解析 …… 王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖(1035)
四川省典型工业行业 $PM_{2.5}$ 成分谱分析 …… 冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏(1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析 …… 赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏(1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源分析 …… 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华(1062)
新乡冬季 $PM_{2.5}$ 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析 …… 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎(1071)
烟台市环境受体 $PM_{2.5}$ 四季污染特征与来源解析 …… 刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂(1082)
常州市冬季 $PM_{2.5}$ 中类腐殖质昼夜特征分析 …… 顾远, 李清, 黄雯倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲(1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险 …… 曹红梅,赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏(1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析 …… 邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰(1111)
中国城市 O_3 浓度时空变化特征及驱动因素 …… 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永(1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征 …… 张倩倩, 张兴赢(1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析 …… 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民(1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立 …… 高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小栓(1152)
异戊二烯和甲苯二次有机示踪物的臭氧非均相氧化 …… 黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰(1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征 …… 栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强(1172)
成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析 …… 胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城(1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO_2 扩散通量估算 …… 张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 仝川(1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化 …… 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉(1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学 …… 劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征 …… 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健(1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析 …… 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王建力, 郭永丽, 张清华(1222)
鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素 …… 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛(1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征 …… 吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林(1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUSt 功能预测分析 …… 张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进(1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响 …… 刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林(1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价 …… 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林(1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响 …… 黄磊, 梁银坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成(1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性 …… 何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳(1287)
$BiOCl\text{-}(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 …… 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静(1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除 …… 吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平(1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除 …… 邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫(1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性 …… 易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏(1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素 …… 程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟(1328)
静止和水动力扰动状态下锆改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响 …… 俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜(1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制 …… 王大鹏, 张娴, 颜昌宙(1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析 …… 徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦婷, 汤同欢(1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响 …… 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 梅宁, 李帅, 张杰(1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复 …… 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博(1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能 …… 马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志(1375)
不同曝气量和好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能 …… 袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建园(1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水 …… 李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性 …… 谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤(1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征 …… 任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇(1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征 …… 付昆明, 廖敏辉, 周厚田, 付巢, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹(1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析 …… 刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 陈昌明(1419)
温度对硝化杆菌(*Nitrobacter*)活性动力学影响 …… 于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛(1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化 …… 牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山(1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响 …… 彭晶, 王科, 谷月, 王爱杰(1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 …… 张彦军, 郭胜利(1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应 …… 李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦(1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响 …… 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅(1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征 …… 宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧(1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征 …… 童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水(1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征 …… 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕(1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征 …… 王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅(1504)
大气污染对居民健康影响研究进展 …… 秦耀辰, 谢志祥, 李阳(1512)
《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 3 期 2019 年 3 月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征

童瑶瑶[1,2], 王季斐[1,2], 祝贞科[2], 邓扬悟[1*], 陈珊[2,3], 葛体达[2], 袁红朝[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: 易利用态有机碳是土壤微生物的重要碳源, 影响土壤有机碳的矿化和累积过程, 而易利用态碳源的输入量尤其是相对于土壤微生物生物量碳的不同输入负荷, 对土壤有机碳的矿化影响机制尚不明确. 因此, 本研究采取室内模拟培养实验, 选择不同浓度梯度添加[0.5、1、3、5 倍微生物量碳(MBC)]^{13}C-葡萄糖, 分析葡萄糖-C 的矿化特征及其激发效应. 结果表明, 葡萄糖-C 矿化率随着外源碳添加量的增加而显著增加; 葡萄糖-C 向快库、慢库分配的比例也分别与碳添加量呈指数关系(R^2 = 0.99, P < 0.05 和 R^2 = 0.99, P < 0.05). 在高添加量处理(3 × MBC、5 × MBC)中, 葡萄糖的添加抑制土壤原有有机碳的矿化, 即表现出负激发效应; 而在低添加量处理(0.5 × MBC、1 × MBC)中, 表现为正激发效应, 60 d 培养结束后累积激发效应分别为 160.0 mg·kg^{-1} 和 325.1 mg·kg^{-1}. 相关性分析结果表明在培养实验前期, 累积激发效应主要受 MBC、MBN 和 DOC 的影响, 而在后期主要 β-葡糖苷酶、几丁质酶和铵态氮的影响. 因此, 稻田土壤有机碳矿化和激发效应与易利用态有机碳添加的碳负荷密切相关, 并通过微生物量和酶活性调控土壤碳的矿化过程. 本研究对于揭示稻田有机碳累积行为与推动农业可持续发展具有重要的科学意义.

关键词: 水稻土; 碳固持; 易利用态碳; 碳负荷; ^{13}C 同位素示标记; 激发效应
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1483-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201807216

Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil

TONG Yao-yao[1,2], WANG Ji-fei[1,2], ZHU Zhen-ke[2], DENG Yang-wu[1*], CHEN Shan[2,3], GE Ti-da[2], YUAN Hong-zhao[2], WU Jin-shui[2]
(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: Available carbon is the most active part of the soil carbon pool. It is also the main carbon source of soil microbes and plays an important role in the processes of soil organic carbon mineralization and accumulation. However, the mechanisms are still not clear how soil organic carbon mineralization and its priming effect (PE) are affected by different input levels of readily available carbon, based on the growth requirements of microbes in paddy soil. In this study, an incubation experiment was conducted by adding different levels (0.5, 1, 3, and 5 times of MBC) of exogenous source organic carbon (^{13}C-glucose) to the soil. The mineralization dynamics of labile organic carbon and its priming effect was investigated. The mineralization rate of glucose-C increased significantly with the increasing carbon loading level. The distribution of glucose-C into rapid and slow C pools was also exponentially correlated with the carbon loading (R^2 = 0.99, P < 0.05 and R^2 = 0.99, P < 0.05, respectively). Negative PE was observed at high carbon loading (3 × MBC and 5 × MBC); while positive PE was induced by low carbon loading (0.5 × MBC and 1 × MBC). The cumulative PE was 160.0 mg·kg^{-1} and 325.1 mg·kg^{-1}, respectively, at the end of the incubation. Redundancy analysis showed that the main factors affecting the cumulative PE were MBC, MBN, and DOC at the initial glucose mineralization stage, while β-glucosidase, chitinase, and ammonium nitrogen were the main factors at later stages. Therefore, the readily available carbon loading has an important effect on the organic carbon mineralization and PE in paddy soil. Higher carbon loading was good for the accumulation of organic carbon sequestration in paddy soil. This study is of great scientific significance for revealing the activity of organic carbon in paddy fields and for its contribution to the development of sustainable agriculture.

Key words: paddy soil; carbon sequestration; readily available carbon; carbon loading; ^{13}C-labelled glucose; priming effect

土壤有机碳大约占陆地生态系统有机碳储存的四分之三, 其含量是表征土壤肥力的重要指标, 在全球碳循环中扮演重要角色[1]. 在稻田生态系统中, 有机碳的积累可以改善土壤的团聚体结构[2], 提高土壤质量和耕作土地作物的生产力[3], 而且有利于缓解地球温室效应[4], 其有机碳库大小取决于

收稿日期: 2018-07-26; **修订日期**: 2018-09-23
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; 2016 年中国科学院仪器功能开发项目
作者简介: 童瑶瑶(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态技术与工程, E-mail: tongyaoyao0206@sina.com
* 通信作者, E-mail: tosang@foxmail.com

碳输入和碳输出的动态变化. 施肥、秸秆还田和根系分泌物等是碳输入的主要方式, 而土壤碳输出的主要途径是外源有机碳的分解和土壤原有有机质的矿化[5]. 有机碳矿化是由微生物驱动, 相关酶介导的分解有机质释放 CO_2 等气体的生物化学过程[6,7]. 外源有机碳输入可引起土壤有机质周转短期内强烈变化的现象称为激发效应[8]. 激发效应与土壤有机碳的分解和积累密切联系, 可反映外源有机碳对土壤原有有机碳矿化作用的强度和方向, 是表征土壤碳循环的重要指标. 目前, 关于土壤有机碳矿化及其激发效应的研究多为添加外源有机质, 如牛粪[9]、生物碳[10]、秸秆[11]等, 其添加方式和添加量因土壤和实验目的而异, 因此关于有机碳矿化及其激发效应的机制尚不明确.

在植物根系、微生物和土壤有机碳库之间的相互作用中, 微生物具有重要的介导作用; 外源碳底物添加量与土壤微生物生物量碳(MBC)存在一定的关系, 外源碳量相对于 MBC 的比例称为"碳负荷"[12], 同时微生物对底物碳的转换率是碳固存的重要因素[13]. Blagodatskaya 等[12]探讨微生物量和微生物结构对表观激发相应和真实激发效应的机制, 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, 并提出计算土壤碳底物时应该考虑土壤微生物碳量. Wang 等[6]提出新鲜有机质的输入量会影响微生物对底物的利用, 以及对土壤有机质的矿化. 另外, Guenet 等[14]的研究证明新鲜有机质的输入与激发效应不存在线性关系. 然而对于微生物、外源碳输入量以及激发相应三者之间的关系研究甚少. 因此, 以土壤微生物碳量为微生物对碳的需求量大小的依据, 采用分梯度添加方式来研究微生物对土壤碳矿化和激发效应的作用规律,可以深入揭示微生物活性碳库对外源碳输入量的响应特征.

葡萄糖是一种易利用态的糖类有机碳, 约占植物根系分泌的碳水化合物的一半, 是微生物生长的主要碳源[15,16]. 此外, 微生物呼吸响应水平随葡萄糖负荷速率的增加而增加, 直到微生物的碳需求达到饱和为止[17]. 因此, 选择葡萄糖为典型外源有机碳, 研究在不同碳负荷梯度下, 稻田有机碳矿化及其激发效应, 进而深入探讨土壤碳转化的调控机制.

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

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), 该地区为亚热带季风湿润气候, 平均气温 16 ~ 18℃, >10℃积温5 000 ~ 5 800℃, 无霜期 260 ~ 310 d, 年降雨量1 200 ~ 1 700 mm. 采用直径为 5 cm 不锈钢土钻采集 0 ~ 20 cm 的耕作层土壤, 除去可见杂质(植物残体、石头等), 然后室内自然风干, 分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛, 用于测定土壤基本理化性质[18]. 剩余土样风干后过 2 mm 筛, 备用. 供试土壤基本理化性质: pH 为 6.0, 黏粒含量(质量分数)14.1%, 砂粒含量 6.7%, 粉粒 79.2%, 土壤有机碳(SOC)18.6 $g\cdot kg^{-1}$, 土壤可溶性有机碳(DOC)18.5 $g\cdot kg^{-1}$, 碳氮比(C/N)10∶7, 碱解氮 0.13 $g\cdot kg^{-1}$, 微生物碳量(MBC) 0.63 $g\cdot kg^{-1}$.

1.2 土壤培养实验

为研究在不同碳负荷条件下, 微生物对稻田土壤有机碳及其激发效应的作用, 本实验共设计了 5 个添加处理: ①对照(CK), ②土 +0.5 × MBC, ③土 +1 × MBC, ④土 +3 × MBC, ⑤土 +5 × MBC, 每处理设置 3 个重复. 将过 2 mm 的土壤置于 50 L 塑料桶中, 淹水 2 ~ 3 cm, 25℃恒温预培养 14 d. 称取预培养后混匀的土样 20 g(干土计)于 500 mL 厌氧瓶中, 添加上述含量的^{13}C-葡萄糖溶液, 淹水培养(干土/水 = 1/2), 置于 25℃恒温培养室. 在培养的前 15 d 每天采集气体, 之后分别在第 18、22、26、30、35、40、50 和 60 d 采集气体. 采气方法: 选用一次性注射器采集气体 30 mL 到已抽真空的顶空瓶中, 利用鼓气装置将厌氧瓶中剩余气体鼓出, 待剩余气体排尽后, 重新密封并置于恒温培养室继续培养.

另称取土样 200 g(干重)于培养瓶中在上述相同条件下, 每隔 5 d 开盖通气, 并在 2 d 和 60 d 进行破坏性采样, 测定其NH_4^+-N和 MBN 等理化指标, 并采集 10 g 鲜土样于 -20℃保存, 短期内测定土壤酶活性指标.

1.3 测定与分析方法

土壤 pH 测定以水为浸提剂, 水土比为 2.5∶1, 采用 Mettler-toledo320pH 计(FE20K, 瑞士)测定; 土壤机械组成采用激光粒度仪测定. 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)采用碳氮元素分析仪(VARIO MAXC/N, 德国)测定(干烧法). NH_4^+-N采用流动注射仪(Fiastar5000, 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. 土壤溶解性有机碳(DOC, $mg\cdot kg^{-1}$)采用有机碳分析仪(岛津 Vwp, 日本)测定. 土壤氮转化酶活性的测定采用 96 微孔酶标板荧光分析法[19]. CO_2 气体含量用气相色谱(Shimadzu, Kyoto, 日本)测定. 土壤、葡萄糖和 CO_2 的^{13}C 丰度用 MAT253 同位素质

谱仪(Thermo Fisher Scientific, Waltham, US)测定.

1.4 数据处理

添加^{13}C-葡萄糖于稻田土壤中培养，土壤原有碳和外加葡萄糖矿化作用产生 CO_2 气体，计算公式[20]见式(1)和式(2).

$$C_{SOC} = C_{measure} \times \frac{\delta^{13}CO_{2,\,measure} - \delta^{13}CO_{2,\,glucose}}{\delta^{13}CO_{2,\,SOC} - \delta^{13}CO_{2,\,glucose}} \quad (1)$$

$$C_{glucose} = C_{measure} - C_{SOC} \quad (2)$$

式中，C_{SOC}是来源 SOC 的 CO_2 量，mg·kg^{-1}；$C_{measure}$是测量的总 CO_2 释放量，mg·kg^{-1}；$C_{glucose}$是外源碳分解产生的 CO_2 量，mg·kg^{-1}；$\delta^{13}CO_{2,\,measure}$是总 CO_2 测量的^{13}C 丰度；$\delta^{13}CO_{2,SOC}$是 SOC 分解释放的^{13}C丰度(对照组释放的^{13}C丰度)，$\delta^{13}CO_{2,\,glucose}$是添加至样品中的^{13}C丰度.

葡萄糖-C 的累积矿化量是各取样点 CO_2 生成量的总和，葡萄糖-C 的矿化率用^{13}C-CO_2 的量与加入土壤中葡萄糖-^{13}C总量的比值表示.

激发效应(PE)计算公式[21]见式(3).

$$PE = C_{SOC\text{-}AME} - C_{SOC\text{-}CON} \quad (3)$$

式中，$C_{SOC\text{-}AME}$表示添加葡萄糖处理中来源于土壤有机碳(SOC)的 CO_2 的量，mg·kg^{-1}；$C_{SOC\text{-}CON}$表示对照处理中来源于土壤有机碳的 CO_2 量，mg·kg^{-1}.

土壤中易被微生物迅速分解利用的那部分活性碳为快库(a_1)，而暂时固定于微生物体内以及被土壤矿物或团聚体稳定的相对难以利用的惰性碳为慢库(a_2). 双库模型计算公式见式(4).

$$S = a_1 \times e^{-K_1 t} + a_2 \times e^{-K_2 t} \quad (4)$$

式中，a_1 和 a_2 分别为快库和慢库的比例(%)；K_1 和 K_2 分别为快库和慢库的矿化速率常数(d^{-1})；S 为累积矿化量；t 为培养时间. 在双库模型中假设 $a_1 + a_2 = 100\%$，利用 60 d 内累积矿化量进行双库模型的拟合得出参数 a_1、a_2、K_1、K_2.

土壤有机碳的半衰期($T_{1/2}$/d)计算：

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{K_2} \quad (5)$$

土壤快库的平均滞留时间(MRT/d)计算如下：

$$MRT = \frac{1}{K_1} \quad (6)$$

测定结果均为 3 次重复的平均值，所得数据采用 Microsoft Excel 2010 处理、采用 Origin 8.5 绘图，采用 Sigma plot 12.5 软件进行双库模型拟合，运用 SPSS 16.0 软件进行各因子间相关性分析，通过 Canoco5 实现环境因子的 RDA(冗余分析).

2 结果与分析

2.1 不同碳负荷梯度下土壤外源碳的矿化

有机碳累积矿化总量随着葡萄糖-C 负荷的增加而增加，其矿化率在 60 d 培养期内呈两个阶段变化趋势：在 0 ~ 20 d 快速分解，而后逐渐达到稳定(图 1). 葡萄糖添加显著增加了土壤碳的矿化，相比于不添加外源碳的处理(CK，587.8 mg·kg^{-1})，葡萄糖-C 的添加促进了 CO_2 释放，分别提高了 1.4 倍(0.5 × MBC)、2.0 倍(1 × MBC)、3.2 倍(3 × MBC)和 4.2 倍(5 × MBC)[图 1(a)]. 土壤中葡萄糖-C 快速矿化生成$^{13}CO_2$；相比于高负荷处理，低负荷处理快速矿化，10 d 左右达到稳定状态；高负荷下$^{13}CO_2$-C 累积排放量在 20d 左右达到稳定[图 1(b)]. 负荷为 0.5 × MBC 处理有 852.2 mg·kg^{-1} 的$^{13}C\,O_2$-C 生成，而 1 × MBC、3 × MBC 和 5 × MBC 处理分别是 0.5 × MBC 处理的 2.7、9.8、16 倍.

土壤添加的易利用态碳快速分解，在 60 d 培养实验结束时，葡萄糖-C 矿化为 34.9% ~ 56.7%[图 2(a)]；葡萄糖-C 累积矿化率随添加负荷量的增加而呈指数增加[图 2(b)]. 负荷为 0.5 × MBC 和 1 × MBC 处理中矿化率平稳在 30% 和 40% 左右，而负荷 3 × MBC 和 5 × MBC 的处理中矿化率可达 53%

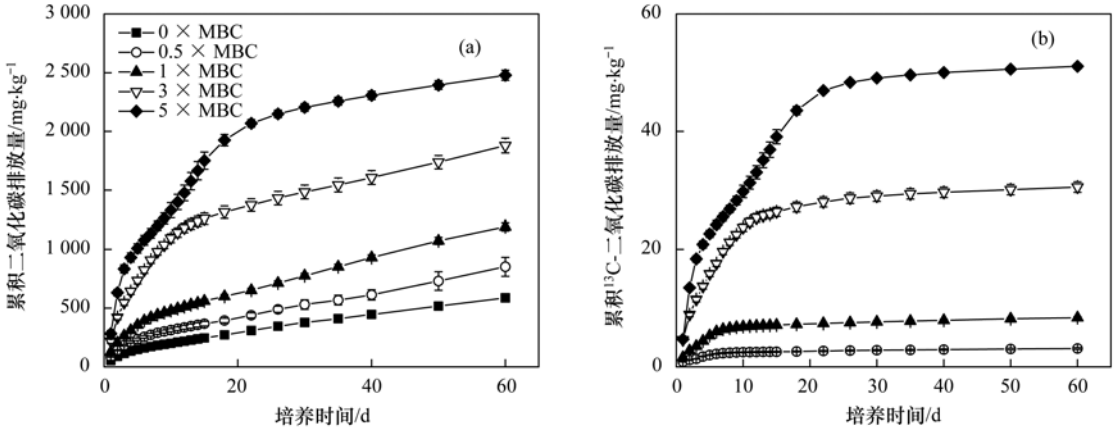

图 1　不同碳负荷梯度下葡萄糖矿化产生 CO_2 和$^{13}CO_2$-C规律

Fig. 1　Cumulative CO_2 and $^{13}CO_2$-C production from mineralization of glucose relative to carbon loading

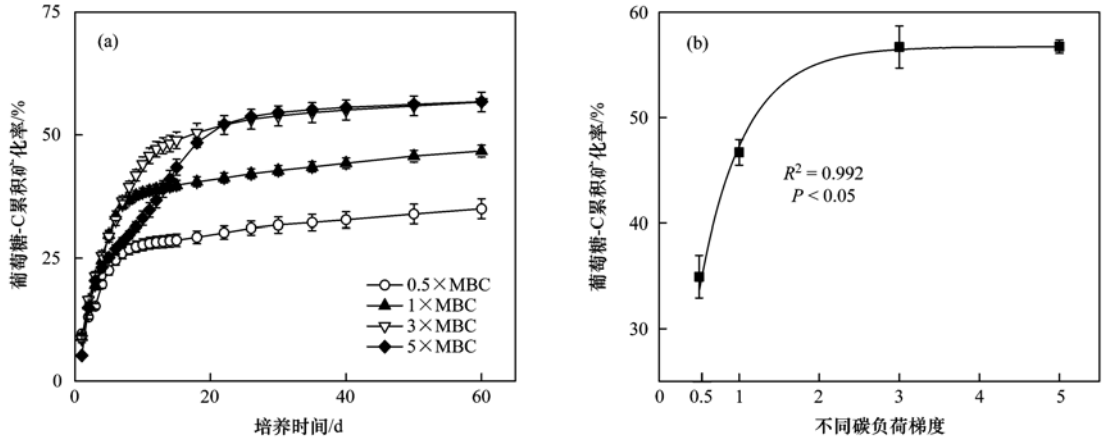

图 2 不同碳负荷梯度下的葡萄糖-C 矿化率和葡萄糖 60 d 累积矿化率与易利用态碳负荷之间的关系

Fig. 2 Cumulative glucose mineralization rate at the end of 60d incubation and relationships of carbon loading with the cumulative glucose-C mineralization rate

左右[图 2(b)]. 同样, 在 60 d 培养结束时, 低负荷的矿化率比高负荷的矿化率要更低, 而且在负荷过高时葡萄糖-C 矿化率不再变化, 如图 2(b)所示, 不同负荷葡萄糖-C 累积矿化率符合一级动力学方程的变化规律($R^2 = 0.99$, $P < 0.05$).

2.2 不同碳负荷梯度下葡萄糖碳库的分配

葡萄糖的输入负荷不仅可以改变其矿化率, 而且改变了其在土壤中快库和慢库间的分配. 利用一级动力学双指数模型拟合葡萄糖-C 在土壤碳库中分配的动态变化[22], 由图 3 可知, 随着易利用态碳负荷的增加, 葡萄糖-C 向土壤快库分配的比例逐渐由 26% 增加至 56%; 而向慢库分配的比例由 72% 降低至 42%, 土壤中葡萄糖-C 快库、慢库的比例和不同负荷易利用态碳之间呈现指数关系($R^2 = 0.99$, $P < 0.05$ 和 $R^2 = 0.99$, $P < 0.05$), 当葡萄糖-C添加量大于 3 × MBC 时, 其分配比例不再受输入负荷的影响(图 3). 另外, 由表 1 可以看出, 碳滞留时间在低负荷条件下差异不大, 但在高负荷条件下有明显的差异.

表 1 不同碳负荷易梯度下的生物可利用标记的碳库、碳持留时间和 CO_2 中^{13}C的半衰期[1)]

Table 1 Bioavailable labeled substrate C pool, mean residence time (MRT), and half-life of cumulative ^{13}C recovery in CO_2 under different gradient carbon loading

处理	活性碳库/%	平均滞留时间/d	半衰期/d	R^2
0.5 × MBC	31.35 ± 1.59	4.17 ± 0.12	2.89 ± 0.08	0.94
1 × MBC	43.10 ± 1.07	4.51 ± 0.13	3.13 ± 0.09	0.98
3 × MBC	54.83 ± 2.00	6.35 ± 0.03	4.40 ± 0.02	1.00
5 × MBC	56.63 ± 0.41	10.06 ± 0.57	6.97 ± 0.40	0.97

1) 表中活性碳库/%、平均滞留时间/d、半衰期/d 和 R^2 是根据图 2 中葡萄糖-C 累积矿化率计算

2.3 不同碳负荷梯度下的累积激发效应

在 60 d 的培养过程中, 所有输入负荷下, 葡萄糖对土壤原有有机碳的矿化均表现为正累积激发效应(图 4). 在实验初期(前 15 d), 激发效应随葡萄糖负荷的升高而增强. 随着培养时间, 累积激发效应逐渐增加. 20 d 后, 5 × MBC 处理出现轻微负激发效应, 其他处理中激发效应依然为正; 负荷为 3 × MBC 虽然比 1 × MBC 处理增加了两倍, 但是 60 d 累积激发效应却下降了 20.7%. 培养 60 d 时, 1 × MBC 处理累积激发效应最大, (325.1 $mg \cdot kg^{-1}$), 而负荷为 0.5 × MBC 处理累积激发效应最小(160.0 $mg \cdot kg^{-1}$).

2.4 土壤物理化学生物特性与激发效应的关系

冗余分析(RDA)表明, 前期其累积激发效应主要是受 MBC、MBN 以及 DOC 影响, 后期主要是受 β-葡糖苷酶、几丁质酶以及铵态氮的影响(图 5). 这与不同负荷累积激发效应前期呈正相关和后期出现差异结果一致(图 4). 同时, 对 2 d 和 60 d 的不同碳负荷梯度的累积矿化率和累积激发效应与土壤基本指标进行 Pearson 相关分析发现(表 2 和表 3), 在 2 d 时累积矿化率和累积激发效应与 MBC 呈正相关($R = 0.24$, $P < 0.01$; $R = 0.36$, $P < 0.01$), 而累积激发效应与 DOC 呈显著正相关关系($R = 0.96$, $P < 0.01$), 在 2d 累积矿化率与 β-葡糖苷酶和几丁质酶活性呈显著负相关($R = -0.76$, $P < 0.01$; $R = -0.87$, $P < 0.01$), 在 60 d 累积矿化率与 β-葡糖苷酶和几丁质酶活性呈显著正相关($R = 0.78$, $P < 0.01$; $R = 0.72$, $P < 0.01$).

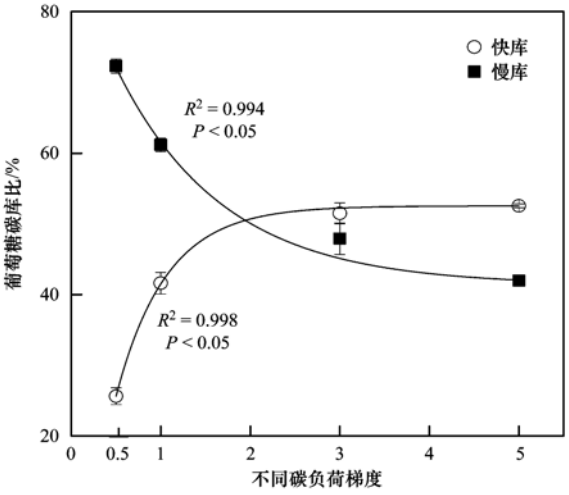

图 3　土壤中葡萄糖-C 快库与慢库的比例及其与碳负荷之间的关系

Fig. 3　Relationship of carbon loading with the ratio of readily available and slowly available C in ^{13}C glucose

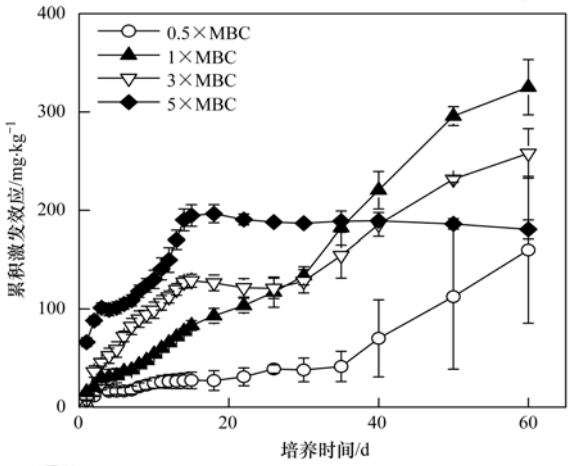

图 4　不同碳负荷梯度下的累积激发效应

Fig. 4　Cumulative priming effect of the initial 60 days

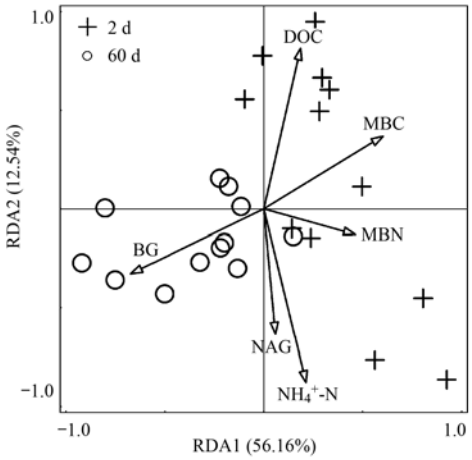

图 5　影响累积激发效应因素的 RDA 分析

Fig. 5　RDA of influencing factors on the cumulative priming effect

3　讨论

3.1　不同碳负荷梯度下外源易利用态碳矿化特征

在稻田土壤中，葡萄糖矿化产生 CO_2 和 $^{13}CO_2$ 量随着负荷的增加而增大(图 1)，这表明碳源供应增加能有效促进微生物活性. 这与 Blagodatskaya[23] 等的结论：土壤溶液中的葡萄糖促进微生物从休眠期或潜在活跃期过渡到活跃阶段现象一致；而这种激活进一步促进了胞外酶的产生，从而加速了土壤有机质的分解和养分(主要是 N、P 和 S)的释放. 土壤中碳储存量通常是新鲜有机质输入量的线性函数[24,25]，而新鲜有机质输入会影响土壤有机质矿化速率，可以通过新鲜有机质的输入来增加或减少 SOM 的矿化速率[14]. 有研究显示 Glu-^{13}C 累积矿化率符合一级动力学方程的变化规律($R^2 = 0.99$，$P < 0.05$)，通过调节土壤能源物质和微生物活性进而

表 2　2 d 累积激发强度和土壤基本指标的 Pearson 相关分析[1)]

Table 2　Pearson correlation analysis of priming effect intension and soil basic index in 2 days

	累积矿化率	累积激发效应	DOC	MBC	铵态氮	MBN	β-葡糖苷酶	几丁质酶
累积矿化率	1							
累积激发效应	0.285	1						
DOC	0.338	0.959**	1					
MBC	0.242	0.359	0.157	1				
铵态氮	−0.640*	−0.817**	−0.907**	−0.085	1			
MBN	−0.281	−0.819**	−0.812**	−0.200	0.732**	1		
β-葡糖苷酶	−0.761**	−0.377	−0.515	0.239	0.777**	0.407	1	
几丁质酶	−0.872**	−0.505	−0.575	−0.053	0.834**	0.544	0.929**	1

1)＊＊表示有显著或极显著相关关系，下同

影响土壤碳库的易利用性，这与土壤生态系统中有机碳的迁移、固持以及 CO_2、CH_4 的释放有密切联系，成为土壤有机碳分解矿化的动力和土壤质量演变的关键指标[26]. 基于葡萄糖-C 矿化率的一级双指数模型，得到土壤中葡萄糖-C 主要是以微生物易利用态碳快速转化的碳库(快库)形式存在，其比例最后平稳在 45% 左右，且平稳节点大致在碳负荷 2 × MBC，这与激发效应在负荷 3 × MBC 出现短暂的负激发效应和负荷为 5 × MBC 后期出现持续的负激发效应结果一致. 且两种碳库的分配比例均与易利用态碳添加量表现出显著的指数关系($R^2 = 0.99$，$P < 0.05$ 和 $R^2 = 0.99$，$P < 0.05$)．负荷为 3 × MBC

表 3 60 d 累积激发强度和土壤基本指标的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis of priming effect intension and soil basic index in 60 days

	累积矿化率	累积激发效应	DOC	MBC	铵态氮	MBN	β-葡糖苷酶	几丁质酶
累积矿化率	1							
累积激发效应	0.156	1						
DOC	0.592 *	−0.109	1					
MBC	−0.768 **	0.123	−0.762 **	1				
铵态氮	−0.807 **	0.292	−0.575	0.823 **	1			
MBN	−0.822 **	−0.224	−0.244	0.695 *	0.719 **	1		
β-葡糖苷酶	0.780 **	−0.530	0.260	−0.690 *	−0.817 **	−0.923 **	1	
几丁质酶	0.724 **	−0.111	0.293	−0.621 *	0.746 **	−0.831 **	0.931 **	1

和 5 × MBC 都具有最高且相近(55% 左右)的生物可利用碳库, 并且负荷为 0.5 × MBC, 1 × MBC 具有最低且相近的碳滞留时间(4 d), 这表明在 3 × MBC 已经满足了微生物的能量需求, 更多的葡萄糖以稳定碳储存; 而负荷 5 × MBC 同时具有最高生物可利用碳库以及最长的碳滞留时间, 这表明负荷 5 × MBC 的处理完全超过了微生物的碳需求量, 这也与 Glu-C 矿化率的结果一致[27,28]. 在这些研究中, 初始时葡萄糖快速分解是由于在添加的底物中添加了易利用态的化合物. 在加入的底物中消耗掉易利用的碳后, 添加的基质与天然矿物稳定的 SOC(如角质和木质素)一起被利用[29]. 本研究显示, 起初 CO_2 和 $^{13}CO_2$ 矿化矿化速率加快, 后期矿化量逐渐平缓, 这种转变可能涉及物种优势的改变, 即在分解的早期阶段, 迅速繁殖的细菌使用更多的易利用态化合物, 而增长缓慢的真菌分解较难降解的有机质[29,30].

3.2 不同碳负荷梯度对激发效应的影响

微生物活性是土壤有机质(SOM)分解的重要因素, 由于微生物生长及其活性很大程度上取决于底物的可利用程度, 这些底物间接地影响了 SOM 分解[7]. 而 SOM 分解的加速或延缓主要取决于土壤的营养状况和微生物在增长阶段时土壤中的碳氮比[17,31]. 在此研究中, 累积激发效应在实验初期随着负荷增加而增强, 这可能是前期微生物代谢生长而产生的表观激发效应, 这与 Blagodatskaya 等[12]提出表观激发效应理论一致, 即随着微生物代谢的激活和微生物生物量的增加, 二氧化碳的加速演化与 SOM 的代谢无关, 主要是通过微量的底物加速内部微生物的新陈代谢, 并立即(几分钟至几小时)增加呼吸活动; 但负荷为 3 × MBC 在实验中期出现了短暂的负激发效应, 负荷为 5 × MBC 的处理在后期持续的微弱负激发效应. 在负荷为 3 × MBC 处理中可能是与微生物群落结构的变化有关, 土壤有机碳主要用于微生物生长[17]; 而负荷为 5 × MBC 的处理主要是由于添加的易利用态碳满足了微生物生长以及繁殖的需求而出现持续的负激发效应[31]. 1 × MBC 处理的碳累积激发是最高的, 并且保持持续的正激发效应, 可能在实验初期激发效应随易利用态碳量增加而增加, 而后期由于有机底物的输入促进了微生物活性, 使胞外酶分泌增加, 引起 SOC 持续的共代谢[32]. 因此, 负荷 1 × MBC 的处理可能刚好满足了微生物的呼吸利用, 但生长繁殖的要求还没有达到, 因此需要分泌胞外酶分解 SOM 来维持生长繁殖. 综上也证明对于不同梯度碳负荷和激发效应与微生物碳量有一个碳需求饱和关系. 此外, 本实验初期累积激发效应与 DOC 显著正相关, 也证明了表观激发效应的理论[12], 以及 β-葡糖苷酶和几丁质酶与矿化率呈显著负相关说明初期胞外酶对碳源的矿化没有影响; 而铵态氮和 MBN 与累积激发效应呈负相关关系, 这可能是由于实验处理添加的外源碳而导致的氮限制, 当添加过量外源碳而造成了氮限制时, 激发效应不明显[17], 这也与碳负荷为 5 × MBC 后期出现的微弱的激发现象表现一致. β-葡糖苷酶和几丁质酶在微生物碳源获取中有重要意义, 其活性受碳源有效性的影响[33,34]. 在激发效应的后期, β-葡糖苷酶与累积激发效应的负相关性增强, 而 β-葡糖苷酶通过将纤维二糖转化为葡萄糖完成纤维素水解的最后一步, 为中枢代谢提供葡萄糖[35]; 而几丁质酶与其的负相关性变弱, 几丁质酶的主要作用是分解代谢和几丁质作为碳和能源的利用. 这也说明在低碳负荷处理中激发效应为正时主要分解土壤中较难分解的有机质; 同时, 这两种酶活性的变化可能与矿化培养时期微生物利用策略的转换相关.

4 结论

(1) 土壤有机碳的矿化随着葡萄糖-C 负荷的增加而增加, 主要表现为在前期快速矿化而后逐渐达到稳定. 碳负荷的增加显著增加了葡萄糖-C 向土壤快速转化碳库中的分配, 促进土壤碳的累积矿化率.

（2）易利用态碳源的输入促进了土壤有机碳的矿化，表现为持续的正激发效应；而且正激发效应随碳负荷的增加而逐渐增加.

（3）不同碳负荷条件下，矿化前期的累积激发效应主要受土壤微生物生物量(MBC)的影响，而在后期主要受土壤酶活性(β-葡糖苷酶、几丁质酶)的影响.

参考文献：

[1] 冯嘉仪，储双双，王婧，等. 华南地区几种典型人工林土壤有机碳密度及其与土壤物理性质的关系[J]. 华南农业大学学报，2018，**39**(1)：83-90.
Feng J Y，Chu S S，Wang J，*et al*. Soil organic carbon density and its relationship with soil physical properties of typical plantations in South China [J]. Journal of South China Agricultural University，2018，**39**(1)：83-90.

[2] Angst G，Mueller K E，Kögel-Knabner I，*et al*. Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay-sized particulate and mineral associated organic matter [J]. Biogeochemistry，2017，**132**(3)：307-324.

[3] Pump J，Conrad R. Rice biomass production and carbon cycling in $^{13}C\ O_2$ pulse-labeled microcosms with different soils under submerged conditions [J]. Plant and soil，2014，**384**(1-2)：213-229.

[4] 叶功富，尤龙辉，卢昌义，等. 全球气候变化及森林生态系统的适应性管理[J]. 世界林业研究，2015，**28**(1)：1-6.
Ye G F，You L H，Lu C Y，*et al*. Global climate change and adaptive management of forest ecosystem [J]. World Forestry Research，2015，**28**(1)：1-6.

[5] 徐嘉晖，孙颖，高雷，等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报，2018，**26**(2)：222-230.
Xu J H，Sun Y，Gao L，*et al*. A review of the factors influencing soil organic carbon stability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2018，**26**(2)：222-230.

[6] Wang H，Boutton T W，Xu W H，*et al*. Quality of fresh organic matter affects priming of soil organic matter and substrate utilization patterns of microbes[J]. Scientific Reports，2015，**5**：10102.

[7] Blagodatsky S，Blagodatskaya E，Yuyukina T，*et al*. Model of apparent and real priming effects：linking microbial activity with soil organic matter decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry，2010，**42**(8)：1275-1283.

[8] Kuzyakov Y，Friedel J K，Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry，2000，**32**(11-12)：1485-1498.

[9] 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.

[10] 葛晓改，周本智，肖文发，等. 生物质炭输入对土壤碳排放的激发效应研究进展[J]. 生态环境学报，2016，**25**(2)：339-345.
Ge X G，Zhou B Z，Xiao W F，*et al*. Priming effect of biochar addition on soil carbon emission：a review [J]. Ecology and Environmental Sciences，2016，**25**(2)：339-345.

[11] 苗淑杰，乔云发，张福韬. 黑土团聚体碳矿化和小麦秸秆对其的激发效应[J]. 水土保持学报，2014，**28**(4)：218-221.
Miao S J，Qiao Y F，Zhang F T. Priming effect of wheat straw addition on organic carbon mineralization in various aggregates of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2014，**28**(4)：218-221.

[12] 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.

[13] 程璞，张慧，陈健. 进水碳负荷浓度对垂直潜流式人工湿地中植物根系微生物动态的影响[J]. 环境工程学报，2014，**8**(5)：2006-2012.
Cheng P，Zhang H，Chen J. Effects of influent carbon loading on rhizosphere microbial diversity in vertical subsurface-flow constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2014，**8**(5)：2006-2012.

[14] Guenet B，Neill C，Bardoux G，*et al*. Is there a linear relationship between priming effect intensity and the amount of organic matter input? [J]. Applied Soil Ecology，2010，**46**(3)：436-442.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Blagodatskaya E V，Blagodatsky S A，Anderson T H，*et al*. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies[J]. Applied Soil Ecology，2007，**37**(1-2)：95-105.

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

[19] 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.

[20] 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.

[21] Chen R R，Senbayram M，Blagodatsky S，*et al*. Soil C and N availability determine the priming effect：microbial N mining and stoichiometric decomposition theories [J]. Global Change Biology，2014，**20**(7)：2356-2367.

[22] Sinsabaugh R L，Manzoni S，Moorhead D L，*et al*. Carbon use efficiency of microbial communities：stoichiometry，methodology and modelling [J]. Ecology Letters，2013，**16**(7)：930-939.

[23] Blagodatskaya E，Kuzyakov Y. Active microorganisms in soil：critical review of estimation criteria and approaches [J]. Soil Biology and Biochemistry，2013，**67**：192-211.

[24] Petersen B M，Jensen L S，Hansen S，*et al*. CN-SIM：a model for the turnover of soil organic matter. II. Short-term carbon and nitrogen development[J]. Soil Biology and Biochemistry，2005，**37**(2)：375-393.

[25] Grace P R，Ladd J N，Robertson G P，*et al*. SOCRATES—a simple model for predicting long-term changes in soil organic carbon in terrestrial ecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry，2006，**38**(5)：1172-1176.

[26] Dharmakeerthi R S，Hanley K，Whitman T，*et al*. Organic

carbon dynamics in soils with pyrogenic organic matter that received plant residue additions over seven years [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **88**: 268-274.

[27] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant-derived carbon to soil microbial biomass dynamics in a paddy rice microcosm[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **36**(2): 136-142.

[28] Gunina A, Kuzyakov Y. Sugars in soil and sweets for microorganisms: review of origin, content, composition and fate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **90**: 87-100.

[29] Baumann K, Marschner P, Smernik R J, *et al*. Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(9): 1966-1975.

[30] Brant J B, Sulzman E W, Myrold D D. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(8): 2219-2232.

[31] Kuzyakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, **165**(4): 382-396.

[32] 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.

[33] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 44-53.
Li M, Zhang E P, Zhang S H, *et al*. Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(1): 44-53.

[34] Ali R S, Kandeler E, Marhan S, *et al*. Controls on microbially regulated soil organic carbon decomposition at the regional scale [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **118**: 59-68.

[35] 王霏, 王绍琛, 曹明明, 等. 土壤微生物中新型 β-葡萄糖苷酶的挖掘与鉴定[J]. 微生物学通报, 2018, **45**(1): 71-80.
Wang F, Wang S C, Cao M M, *et al*. A novel β-glucosidase from soil microbes[J]. Microbiology China, 2018, **45**(1): 71-80.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 3

Mar. 15, 2019

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 ····· YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, *et al.* (1011)

Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 ····· LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, *et al.* (1024)

Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter ····· WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, *et al.* (1035)

Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, *et al.* (1043)

Source Apportionment and Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City ····· ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, *et al.* (1052)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Heating and Non-heating Periods in Shenyang ····· ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, *et al.* (1062)

Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment ····· YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, *et al.* (1071)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient $PM_{2.5}$ During Four Seasons in Yantai City ····· LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, *et al.* (1082)

Day-night Characteristics of Humic-like Substances in $PM_{2.5}$ During Winter in Changzhou ····· GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, *et al.* (1091)

Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China ····· CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, *et al.* (1101)

Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations ····· QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, *et al.* (1111)

Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, *et al.* (1120)

Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation ····· ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying (1132)

Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan ····· WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, *et al.* (1143)

Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China ····· GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, *et al.* (1152)

Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone ····· HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, *et al.* (1163)

Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City ····· LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, *et al.* (1172)

Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu ····· HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, *et al.* (1179)

Diffusive CO_2 Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model ····· ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, *et al.* (1188)

Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea ····· LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, *et al.* (1198)

Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir ····· LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, *et al.* (1209)

Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China ····· LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, *et al.* (1217)

Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring ····· WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, *et al.* (1222)

Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River ····· HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, *et al.* (1236)

Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City ····· WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, *et al.* (1245)

Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir ····· ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, *et al.* (1252)

Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China ····· LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (1261)

Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) ····· SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, *et al.* (1270)

Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of *Acorus calamus* in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland ····· HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, *et al.* (1280)

Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials ····· HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, *et al.* (1287)

Preparation of BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants ····· ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, *et al.* (1295)

High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source ··· WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, *et al.* (1302)

Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite ····· DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, *et al.* (1310)

Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar ····· YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, *et al.* (1318)

Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution ····· CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, *et al.* (1328)

Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions ····· YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1337)

Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant ····· WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou (1347)

Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes ····· XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, *et al.* (1353)

Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System ····· LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, *et al.* (1360)

Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification ····· LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (1367)

Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance ····· MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, *et al.* (1375)

Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times ····· YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, *et al.* (1382)

ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater ····· LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, *et al.* (1390)

Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ····· XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (1396)

ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics ····· REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, *et al.* (1405)

Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process ····· FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, *et al.* (1412)

Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System ····· LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, *et al.* (1419)

Effect of Temperature on the Activity Kinetics of *Nitrobacter* ····· YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, *et al.* (1426)

Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron ····· NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, *et al.* (1431)

Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems ····· PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, *et al.* (1439)

Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity ····· ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (1446)

Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area ····· LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, *et al.* (1457)

Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area ····· WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, *et al.* (1468)

Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management ····· NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, *et al.* (1475)

Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil ····· TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1483)

Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin ····· XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, *et al.* (1491)

Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain ····· WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, *et al.* (1504)

Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents ····· QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang (1512)