

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



2020

Vol.41 No.5  
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 ..... 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 ..... 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 ..... 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 ..... 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析 ..... 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 ..... 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 ..... 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素分析 ..... 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM<sub>2.5</sub> 关联关系时空变异特征分析 ..... 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 ..... 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 ..... 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 ..... 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 ..... 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 ..... 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 ..... 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 ..... 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 ..... 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 ..... 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 ..... 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 ..... 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 ..... 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 ..... 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 ..... 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 ..... 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 ..... 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 ..... 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 ..... 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系 ..... 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 ..... 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 ..... 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 ..... 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> 体系降解苯甲酸 ..... 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 ..... 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 ..... 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氨比农村污水脱氮 ..... 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 ..... 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 ..... 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 ..... 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 ..... 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 ..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 ..... 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 ..... 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 ..... 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 ..... 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 ..... 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 ..... 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N<sub>2</sub>O 相关功能微生物的影响 ..... 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N<sub>2</sub>O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 ..... 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,闵伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 ..... 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 ..... 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 ..... 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 ..... 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

# 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响

王强<sup>1</sup>, 耿增超<sup>1,2\*</sup>, 许晨阳<sup>1,2</sup>, 郭靖宇<sup>1</sup>, 李倩倩<sup>1</sup>, 刘莉丽<sup>3</sup>, 赵汉红<sup>4</sup>, 杜旭光<sup>5</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 2. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 3. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 4. 汉中市勉县农村能源工作站, 汉中 724200; 5. 汉中市勉县农业技术推广站, 汉中 724200)

**摘要:** 土壤微生物代谢对土壤养分循环和生态系统的稳定至关重要. 为明确施加生物炭对土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率(carbon use efficiency, CUE)的长效影响机制, 于2012年将果树树干、枝条生物炭(450℃、限氧条件下裂解)以不同用量(0、20、40、60和80 t·hm<sup>-2</sup>)施入壤土, 与耕层土壤(0~20 cm)混匀, 小麦玉米轮作7 a后, 通过生态酶化学计量学对土壤微生物代谢养分限制特征进行了定量分析和比较. 结果表明: ①随生物炭施用量的增加, 土壤含水量、有机碳、全氮、碳氮比、碳磷比和氮磷比显著提高, 碳氮磷活性组分、微生物生物量碳氮磷和总磷未表现出明显的规律性, 而5种胞外酶活性( $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶、纤维素酶、亮氨酸氨基多肽酶、 $\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和磷酸酶)显著降低. ②所有处理土壤微生物均受磷限制; 在施加生物炭各处理中, 随施用量的增加微生物代谢碳和磷限制显著提高, 微生物CUE显著降低; 当生物炭施用量为20 t·hm<sup>-2</sup>时, 碳限制(0.625 ± 0.022)和磷限制(62.153° ± 0.892°)最低, 微生物CUE(0.511 ± 0.007)最高. ③偏最小二乘路径建模分析表明, 土壤碳氮磷及其元素化学计量比对磷限制产生了直接的极显著正效应( $P < 0.01$ ), 碳限制与磷限制呈正相关关系( $R^2 = 0.242, P < 0.001$ ), 而碳磷限制又对CUE产生了极显著的负效应( $P < 0.001$ ). 综上, 过量施用生物炭使土壤元素化学计量失衡是导致土壤微生物代谢磷限制加剧的重要因素, 继而诱导了微生物碳限制的增强和CUE的降低. 当生物炭施用量为20 t·hm<sup>-2</sup>时, 微生物代谢所受碳磷限制最低, 且具有最高的微生物CUE, 对于调节土壤微生物代谢、维持生态功能和减少微生物二氧化碳排放最优.

**关键词:** 生物炭(BC); 生态化学计量学; 矢量分析; 微生物养分限制; 微生物碳利用效率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2425-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911062

## Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil

WANG Qiang<sup>1</sup>, GENG Zeng-chao<sup>1,2\*</sup>, XU Chen-yang<sup>1,2</sup>, GUO Jing-yu<sup>1</sup>, LI Qian-qian<sup>1</sup>, LIU Li-li<sup>3</sup>, ZHAO Han-hong<sup>4</sup>, DU Xu-guang<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University Yangling 712100, China; 4. Rural Energy Workstation in Mianxian County, Hanzhong 724200, China; 5. Agrotechnical Promotion Station in Mianxian Country, Hanzhong 724200, China)

**Abstract:** Soil microbial metabolism is vital for nutrient cycling and stability of an ecosystem. To elucidate the long-term effects of biochar application on nutrient limitations and carbon use efficiency (CUE) of soil microbial metabolisms, biochars pyrolyzed at 450°C from trunks and branches of fruit trees under an oxygen-limited condition were mixed with the top Lou soils (0-20 cm) with application amounts of 0, 20, 40, 60, and 80 t·hm<sup>-2</sup> in 2012. Corn-wheat rotation was carried out afterwards for seven years. The nutrient limitations of soil microbial metabolisms were analyzed quantitatively through ecoenzymatic stoichiometry in 2019. The results indicated that: ① With an increase in the biochar application amount, soil moisture, organic carbon, total nitrogen, C:N, C:P, and N:P significantly increased, whereas there were no clear patterns for the active components of carbon, nitrogen, and phosphorus, microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and total phosphorus. In contrast, the activities of five extracellular enzymes ( $\beta$ -1,4-glucosidase, cellobiohydrolase, leucine aminopeptidase,  $\beta$ -1,4-N-acetylglucosaminidase, and phosphatase) were significantly reduced. ② The soil microorganisms suffered from the phosphorus limitation under all treatments in this study. In the treatments of biochar application, the carbon and phosphorus limitations of microbial metabolisms increased significantly with increasing application amount, whereas the microbial CUE decreased significantly. When the application amount was 20 t·hm<sup>-2</sup>, the carbon limitation (0.625 ±

收稿日期: 2019-11-07; 修订日期: 2019-12-13

基金项目: 农业部农业环境重点实验室开放基金项目(K4030217149); 陕西省重点研发计划项目(2018NY-094); 校科技成果推广项目(Z222021810)

作者简介: 王强(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为废弃生物质资源化利用, E-mail: qwang@nwfu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: gengzengchao@126.com

0.022) and phosphorus limitation ( $62.153^\circ \pm 0.892^\circ$ ) were lowest, and the microorganism CUE ( $0.511 \pm 0.007$ ) was highest. ③ Partial least-squares path modeling (PLS-PM) showed that soil carbon, nitrogen, phosphorus, and their stoichiometry had a very direct positive effect on phosphorus limitation ( $P < 0.01$ ), and there was a positive correlation between carbon limitation and phosphorus limitation ( $R^2 = 0.242$ ,  $P < 0.001$ ); in contrast, the carbon and phosphorus limitations had a very significant negative effect on CUE ( $P < 0.001$ ). It was revealed that the excessive application of biochar had caused a soil element stoichiometry imbalance, which deteriorated the phosphorus limitation of the soil microbial metabolism and further led to carbon limitation and reduction of CUE. When the biochar application amount was  $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , C and P limitations were lowest, and microbial CUE was highest. Therefore,  $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  was optimal for regulating soil microbial metabolism, maintaining ecological functions, and reducing carbon dioxide emission produced by microbial metabolism.

**Key words:** biochar (BC); ecological stoichiometry; vector analysis; microbial nutrient limitation; carbon use efficiency

生态化学计量比作为生态系统的组成部分,是限制生物地球化学循环的重要因素,在评估生态系统稳定性、碳循环和微生物代谢限制上得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>.生态化学计量学认为土壤中元素化学计量比(土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比)强烈影响生态系统中土壤微生物代谢碳(C)、氮(N)和磷(P)限制,而且原因可能是由于养分的不平衡供应<sup>[3]</sup>. Delgado-Baquerizo 等<sup>[4]</sup>的研究表明,细菌多样性及结构组成主要是由土壤元素化学计量的变化(C:N:P)所驱动.因此,土壤元素化学计量学通过影响元素平衡和微生物群落结构,强烈调节微生物群落的代谢,可能是导致微生物代谢受限的重要因素.

生物炭(biochar, BC)是由生物质材料(如农业和林业废料)在限氧条件下热解而成<sup>[5]</sup>.起初由于其在土壤中的长期持久性,被用来减少土壤中温室气体的排放<sup>[5]</sup>;近年来被广泛应用于改善土壤理化特性、吸附农田土壤有机无机污染物以提高土壤质量<sup>[6]</sup>.有研究表明,施用生物炭可以改善土壤孔隙、团聚体和养分含量等理化性质,促进农田土壤增汇减排,改善水热特性,对维持农田土壤生态系统平衡有着不可忽视的作用<sup>[7,8]</sup>.陕西关中平原是我国主要的粮食产区,土壤类型以壤土为主,该土壤有机质含量偏低,且由于化肥的长期使用导致农田土壤质量下降,故农业上常使用生物炭来改善土壤质量<sup>[9]</sup>,但目前生物炭对壤土土壤微生物代谢活动的影响尚未可知.因此,本研究基于陕西关中壤土的田间定位试验,分析了果树树干、枝条制成的生物炭施加7a后对土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率(carbon use efficiency, CUE)的影响,从生态酶化学计量角度探究生物炭的施加对土壤微生物代谢的长效影响机制,对壤土最适生物炭添加量进行评估,并通过全面和系统的土壤理化指标来完善生物炭添加对壤土土壤质量影响的数据支撑和科学依据.

## 1 材料方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于陕西省杨凌区西北农林科技大学试

验田( $34^\circ 16' \text{ N}$ ,  $108^\circ 04' \text{ E}$ ),海拔458.60 m,属温带大陆性季风气候,年均日照时数2196 h,年均气温 $11 \sim 13^\circ \text{ C}$ ,年均降雨量500~700 mm.土壤类型为褐土类,壤土亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,属石灰性土壤.试验地耕层(0~20 cm)土壤基础理化特性(平均值)如下:pH为7.33,容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,有机质(SOM)为 $14.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,总磷 $0.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾 $19.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,硝态氮 $18.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铵态氮 $15.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $12.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $193.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 供试材料及试验设计

本研究所用生物炭由废弃果树树干、枝条在裂解炉 $450^\circ \text{ C}$ 、限氧条件下热裂解所得(陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司),磨细过1 mm筛,备用.供试生物炭pH为10.43(土水比为1:10),比表面积为 $86.70 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,碳、氢、氧和氮的质量分数分别为72.38%、2.62%、23.81%、1.19%,灰分的质量分数为13.98%,硝态氮和铵态氮含量分别为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

生物炭于2012年4月一次性均匀撒施(此后不再施入生物炭)并浅翻,与耕层土壤均匀混合.根据用量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )设5个水平:0(B0)、20(B20)、40(B40)、60(B60)和80(B80),采用随机区组试验设计,3次重复,小区面积为 $1.35 \text{ m} \times 3.50 \text{ m}$ ,共计15个小区.各小区除生物炭用量不同外,氮、磷和钾肥(分别为尿素、磷酸二铵和硫酸钾)均作基肥于每次种植前施入,其用量折合成纯养分用量分别为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以N计)、 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 $\text{P}_2\text{O}_5$ 计)和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 $\text{K}_2\text{O}$ 计).

2012年4月至2019年6月在供试土壤上进行玉米-小麦轮作,最后一季小麦收获后,于2019年6月5日用土钻采集耕层(0~20 cm)土壤,除去杂质后过2 mm筛,一部分于 $4^\circ \text{ C}$ 保存用于测定土壤胞外酶活性及微生物生物量碳、氮和磷,另一部分自然风干用于测定土壤基本理化性质,同时采集土壤容重样品,每个小区重复3次.

### 1.3 测定方法

土壤含水量采用 105℃ 烘干法测定; 土壤容重采用环刀法测定; 土壤 pH 采用 pH 计测定(土水比为 1:2.5); 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定; 全氮(TN)采用半微量开氏法测定(K12 型全自动凯氏定氮仪); 土壤总磷(TP)采用 HClO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮-钼锑抗比色法测定; 可溶性有机碳(DOC)采用去离子水浸提-TOC-VCPH 自动分析仪(岛津, 日本)测定; 硝、铵态氮采用 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 浸提-连续流动分析仪法测定; 土壤速效磷采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定。

表 1 土壤胞外酶缩写及所用底物

Table 1 Abbreviations and substrates of soil enzymes assayed

酶名称	缩写	底物
$\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶( $\beta$ -1,4-glucosidase)	BG	4-methylumbelliferyl- $\beta$ -D-glucoside
纤维素酶( cellobiohydrolase)	CBH	4-methylumbelliferyl- $\beta$ -D-cellobioside
亮氨酸氨基多肽酶(leucine aminopeptidase)	LAP	L-leucine-7-amido-4-methylcoumarin hydrochloride
$\beta$ -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶( $\beta$ -1,4-N-acetylglucosaminidase)	NAG	4-methylumbelliferyl-N-acetyl- $\beta$ -D-glucosaminide
磷酸酶(phosphatase)	AP	4-methylumbelliferyl-phosphate

### 1.4 胞外酶活性矢量分析和微生物碳利用效率计算方法

为量化土壤微生物代谢 C、N 和 P 的限制, 对生态酶活性相对比例进行矢量分析<sup>[3]</sup>, 根据胞外酶活性比例  $[(BG + CBH)/(BG + CBH + NAG + LAP)$  和  $(BG + CBH)/(BG + CBH + AP)]$  计算了所有处理的向量长度(碳限制)和角度(小于 45° 为氮限制, 大于 45° 为磷限制)<sup>[13]</sup>。

向量长度为  $x$  和  $y$  平方值之和的平方根, 其中  $x$  代表 C 与 P 获取酶的相对活性,  $y$  代表 C 与 N 获取酶的相对活性。

$$\text{向量长度} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

向量角度为原点到点( $x, y$ )的直线的反正切。

$$\text{向量角度}(\text{°}) = \text{Degrees}[\text{Atan2}(x, y)]$$

使用生物地球化学平衡模型计算微生物碳利用效率(CUE)<sup>[14]</sup>。土壤胞外酶活性(EEA)通过转换以  $\text{nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  为单位(以 SOM 计, 下同)。EEA<sub>C:N</sub> 计算为  $(BG + CBH)/(NAG + LAP)$ , EEA<sub>C:P</sub> 计算为  $(BG + CBH)/AP$ 。SOC:TN 和 SOC:TP 的摩尔比被用作  $L_{C:N}$  和  $L_{C:P}$  的估计值。微生物生物量 C:N 和 C:P ( $B_{C:N}$  和  $B_{C:P}$ ) 也按摩尔比计算:

$$\text{CUE} = \text{CUE}_{\max} \times \{ (S_{C:N} \times S_{C:P}) \div [(K_{C:N} + S_{C:N}) \times (K_{C:P} + S_{C:P})] \}^{0.5}$$

$$S_{C:N} = B_{C:N}/L_{C:N} \times 1/\text{EEA}_{C:N}$$

$$S_{C:P} = B_{C:P}/L_{C:P} \times 1/\text{EEA}_{C:P}$$

式中,  $K_{C:N}$  和  $K_{C:P}$  是基于 C、N 和 P 可用性的 CUE 的半饱和常数。该模型假定当可吸收营养物供应的比

采用氯仿熏蒸法<sup>[10]</sup>测定微生物生物量碳、氮和磷(MBC、MBN 和 MBP)。简言之, 将新鲜土壤样品分成两个子样品, 一组直接用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取碳和氮, 用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 提取磷, 另一组用氯仿熏蒸后提取碳、氮和磷。对于微生物生物量碳、氮和磷, 转换系数分别为 0.45、0.54 和 0.40。

土壤胞外酶活性测定采用 96 微孔酶标板荧光分析法<sup>[11, 12]</sup>, 所用底物如表 1 所示, 采用多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL, Thermo)在激发波长 365 nm、发射波长 450 nm 条件下测定。

例与微生物生物量化学计量相匹配且生长效率与 N 和 P 供给相对于 C 的几何平均值成正比时, 增长率最大。假设所有模型的  $K_{C:N}$  和  $K_{C:P}$  为 0.5,  $\text{CUE}_{\max}$  为 0.6<sup>[14]</sup>。

### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理; SPSS 19.0 进行不同处理间差异显著性分析, 显著性用 One-way ANOVA(单因素方差分析)进行检验( $P < 0.05$ ), 采用 Duncan 多重比较分析组间差异, 土壤各指标间的相关性采用 Pearson 相关系数表示; 在 R 3.6.0 中利用“Plspm”包构造偏最小二乘路径模型(partial least squares path modelling, PLS-PM)确定土壤特性控制土壤微生物养分限制的可能路径; 文中箱线图和散点图采用 Origin 2019b 作图。图表中数据均为平均值  $\pm$  标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质、胞外酶活性及其化学计量分析

#### 2.1.1 各处理土壤理化特性和元素化学计量比

生物炭施加 7 a 后, 随生物炭施加量的增加土壤含水量随之增加, 容重减小。土壤 DOC、硝、铵态氮、速效磷、MBC、MBN 和 MBP 并没有表现出一定的规律性(表 2), DOC 在 B40 处理时含量最高, 为  $(265.83 \pm 3.03) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 硝态氮在 B60 处理时含量达最高, 为  $(11.04 \pm 1.15) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 铵态氮在 B80 处理时含量最高, 为  $(2.13 \pm 0.16) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; MBC、MBN 在 B0 时含量最高, 分别为  $(177.92 \pm 6.67)$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(7.37 \pm 0.21)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;MBP 在 B60 时含量最高,为 $(7.23 \pm 0.63)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

与空白相比(表 2),施加生物炭各处理显著提高了土壤有机碳、全氮、C:N、C:P 和 N:P,并且在 B60 或 B80 时土壤有机碳、全氮、C:N、C:P 和 N:P

达到最大,分别为 $(29.02 \pm 0.86)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(1.32 \pm 0.02)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $22.34 \pm 0.64$ 、 $34.01 \pm 1.44$  和  $1.52 \pm 0.04$ ,在 B0 时 SOC、TN、C:N、C:P 和 N:P 均最小;土壤 TP 随生物炭施加量的增加未表现出明显的规律性.

表 2 各处理土壤理化性质<sup>1)</sup>

Table 2 Soil physicochemical properties under different biochar application amounts

处理	含水量/%	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	SOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TP/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C:N	C:P	N:P
B0	18.68 ± 0.34c	1.44 ± 0.04b	10.91 ± 0.24e	1.14 ± 0.01e	0.90 ± 0.01b	9.53 ± 0.22e	12.09 ± 0.30e	1.27 ± 0.02d
B20	18.83 ± 0.19c	1.54 ± 0.02a	16.15 ± 0.24d	1.23 ± 0.01c	0.96 ± 0.01a	13.15 ± 0.24d	16.87 ± 0.22d	1.28 ± 0.02d
B40	18.71 ± 0.28c	1.39 ± 0.03c	20.31 ± 0.59c	1.17 ± 0.01d	0.89 ± 0.02c	17.32 ± 0.51c	22.95 ± 0.77c	1.33 ± 0.03c
B60	19.61 ± 0.25b	1.33 ± 0.03d	27.92 ± 0.21b	1.32 ± 0.02a	0.91 ± 0.01b	21.12 ± 0.36b	30.53 ± 0.40b	1.45 ± 0.03b
B80	20.01 ± 0.25a	1.41 ± 0.02c	29.02 ± 0.86a	1.30 ± 0.01b	0.85 ± 0.02d	22.34 ± 0.64a	34.01 ± 1.44a	1.52 ± 0.04a

处理	pH	DOC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	MBC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	MBN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	MBP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
B0	8.05 ± 0.08a	245.05 ± 5.66d	3.85 ± 0.31d	1.92 ± 0.12b	6.82 ± 0.30c	177.92 ± 6.67a	7.37 ± 0.21a	3.64 ± 0.19c
B20	8.03 ± 0.01ab	251.61 ± 3.08c	4.89 ± 0.68c	1.77 ± 0.09c	6.39 ± 0.20d	168.91 ± 2.64b	4.89 ± 0.40d	5.58 ± 0.33b
B40	8.02 ± 0.04ab	265.83 ± 3.03a	5.21 ± 0.31c	1.97 ± 0.18b	6.87 ± 0.28c	117.42 ± 5.87d	3.17 ± 0.95e	2.08 ± 0.24d
B60	8.01 ± 0.04ab	259.57 ± 8.03b	11.04 ± 1.15a	1.85 ± 0.16bc	8.20 ± 0.39b	149.37 ± 4.15c	5.44 ± 0.47c	7.23 ± 0.63a
B80	8.00 ± 0.04b	240.55 ± 2.18d	6.86 ± 0.56b	2.13 ± 0.16a	8.91 ± 0.47a	170.84 ± 4.67b	6.20 ± 0.36b	3.42 ± 0.32c

1)不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平( $P < 0.05$ ),下同

### 2.1.2 各处理土壤胞外酶活性及其化学计量比

施加生物炭各处理均显著降低了 5 种胞外酶活性(表 3),且随生物炭施加量的增加酶活性逐渐降低,在 B80 处理下最小,BG、CBH、NAG、LAP 和 AP 活性分别为 $(0.99 \times 10^3 \pm 38.48)$ 、 $(0.18 \times 10^3 \pm 10.05)$ 、 $(0.11 \times 10^3 \pm 6.59)$ 、 $(0.47 \times 10^3 \pm 24.65)$

和 $(2.58 \times 10^3 \pm 116.25)\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ; (BG + CBH)/(NAG + LAP)在 B80( $2.00 \pm 0.08$ )中显著高于其他处理( $P < 0.05$ ), (BG + CBH)/AP 在 B0( $0.47 \pm 0.02$ )和 B80( $0.45 \pm 0.02$ )处理中显著高于其他处理,而(NAG + LAP)/AP 在 B20( $0.33 \pm 0.02$ )最大,显著高于其他处理.

表 3 各处理土壤胞外酶活性及酶活性比值<sup>1)</sup>

Table 3 Soil extracellular enzyme activities and enzyme activity ratios under different biochar application amounts

处理	BG	CBH	NAG	LAP	AP	C:N-酶	C:P-酶	N:P-酶
B0	$2.50 \times 10^3 \pm 114.95a$	$0.35 \times 10^3 \pm 15.38a$	$0.29 \times 10^3 \pm 13.24a$	$1.47 \times 10^3 \pm 46.17a$	$6.10 \times 10^3 \pm 138.91a$	$1.62 \pm 0.09b$	$0.47 \pm 0.02a$	$0.29 \pm 0.01b$
B20	$1.28 \times 10^3 \pm 62.93b$	$0.22 \times 10^3 \pm 5.35b$	$0.14 \times 10^3 \pm 8.58b$	$1.08 \times 10^3 \pm 58.13b$	$3.64 \times 10^3 \pm 171.29b$	$1.24 \pm 0.09d$	$0.41 \pm 0.03bc$	$0.33 \pm 0.02a$
B40	$1.02 \times 10^3 \pm 31.30c$	$0.21 \times 10^3 \pm 11.04b$	$0.14 \times 10^3 \pm 7.18b$	$0.72 \times 10^3 \pm 27.57c$	$3.10 \times 10^3 \pm 121.77c$	$1.44 \pm 0.04c$	$0.40 \pm 0.02c$	$0.28 \pm 0.01c$
B60	$0.94 \times 10^3 \pm 24.70d$	$0.20 \times 10^3 \pm 6.01c$	$0.12 \times 10^3 \pm 5.36c$	$0.60 \times 10^3 \pm 28.67d$	$2.64 \times 10^3 \pm 39.54d$	$1.59 \pm 0.07b$	$0.43 \pm 0.01b$	$0.27 \pm 0.01c$
B80	$0.99 \times 10^3 \pm 38.48cd$	$0.18 \times 10^3 \pm 10.05d$	$0.11 \times 10^3 \pm 6.59c$	$0.47 \times 10^3 \pm 24.65e$	$2.58 \times 10^3 \pm 116.25d$	$2.00 \pm 0.08a$	$0.45 \pm 0.02a$	$0.23 \pm 0.01d$

1)胞外酶活性单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ (以 SOM 计);C:N-酶表示(BG + CBH):(NAG + LAP),C:P-酶表示(BG + CBH):AP,N:P-酶表示(NAG + LAP):AP,下同

### 2.2 生态酶化学计量矢量分析

不同生物炭施加量各处理间生态酶化学计量特征存在差异[图 1(a)],这表明生物炭强烈影响微生物养分的供应.如图 1(a)所示,所有数据点均高于虚线(1:1线),这表明土壤微生物群落受到磷的严重限制.本研究通过使用胞外酶活性相对比例计算矢量的长度和角度来量化微生物碳、氮和磷的限制[图 1(b)和图 1(c)].向量长度(从 0.587 ~ 0.746)和角度(从 60.987° ~ 65.739°)差异显著( $P < 0.05$ ).B20 处理向量长度和角度最低,分别为 $(0.625 \pm 0.023)$ 和 $(62.153^\circ \pm 0.892^\circ)$ ,表明 B20 时微生物受到的碳限制和磷限制最低.B80 的向量长度 $(0.736 \pm 0.007)$ 最高,表明相对碳限制最高;同样,B80 的向量角度 $(64.904^\circ \pm 0.690^\circ)$ 最高,表

明相对磷限制最强.而且矢量角度与矢量长度呈正相关关系[图 1(d)],随着生物炭施加量的增加,土壤微生物代谢所受碳限制和磷限制趋于严重.

### 2.3 各处理土壤微生物 CUE

土壤微生物 CUE 在施加生物炭各处理间差异显著(图 2),均值为 0.469 ( $F = 173.429$ ,  $P < 0.001$ ),在 B20 和 B60 时达到最高和最低值,分别为 $0.511 \pm 0.007$ 和 $0.412 \pm 0.011$ .B20 和 B40 与空白相比,微生物 CUE 差异不显著,但随着生物炭施加量的增加,微生物 CUE 显著降低.

### 2.4 酶活性和生态酶化学计量特征与土壤特性的相关性分析

相关性分析表明(表 4),5 种土壤胞外酶活性与含水量、pH、SOC、TN、TP、C:N、C:P、N:P、MBC、

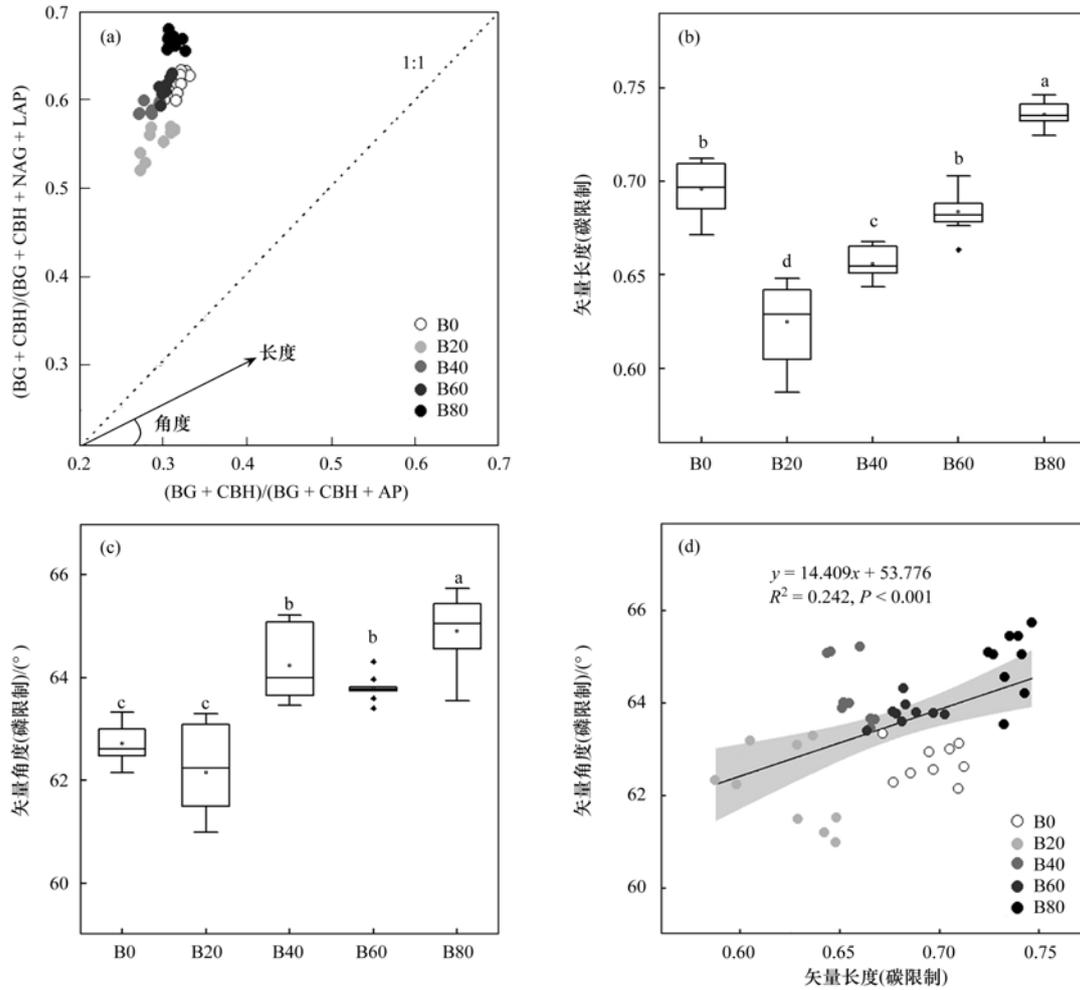


图 1 碳氮获取酶与碳磷获取酶相对比例的生态酶化学计量、矢量长度和角度的变化及其关系

Fig. 1 Ecoenzymatic stoichiometry of relative proportions of C to N acquisition versus C to P acquisition, the variations in vector length, angle, and their relationships

表 4 土壤理化性质和微生物生物量与微生物代谢特征相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlations between soil physicochemical properties and microbial biomass/microbial metabolic characteristics

指标	矢量长度	矢量角度/°	CUE	BG	CBH	NAG	LAP	AP	C: N-酶	C: P-酶	N: P-酶
含水量	<b>0.575***</b>	<b>0.574***</b>	<b>-0.841***</b>	<b>-0.506***</b>	<b>-0.561***</b>	<b>-0.537***</b>	<b>-0.688***</b>	<b>-0.587***</b>	<b>0.656***</b>	0.165	<b>-0.658***</b>
容重	<b>-0.486**</b>	<b>-0.530***</b>	<b>0.639***</b>	0.283	0.199	0.203	<b>0.526***</b>	<b>0.350*</b>	<b>-0.463**</b>	-0.142	<b>0.597***</b>
pH	0.010	-0.207	0.254	<b>0.365*</b>	<b>0.336*</b>	<b>0.339*</b>	<b>0.308*</b>	<b>0.340*</b>	-0.044	0.183	0.133
SOC	<b>0.440**</b>	<b>0.676***</b>	<b>-0.898***</b>	<b>-0.821***</b>	<b>-0.825***</b>	<b>-0.817***</b>	<b>-0.956***</b>	<b>-0.886***</b>	<b>0.530***</b>	-0.06	<b>-0.659***</b>
TN	<b>0.308*</b>	<b>0.380*</b>	<b>-0.858***</b>	<b>-0.686***</b>	<b>-0.728***</b>	<b>-0.732***</b>	<b>-0.744***</b>	<b>-0.750***</b>	<b>0.376*</b>	0.015	<b>-0.398**</b>
TP	<b>-0.690***</b>	<b>-0.717***</b>	<b>0.415**</b>	0.135	0.124	0.074	<b>0.438**</b>	0.194	<b>-0.741***</b>	-0.215	<b>0.817***</b>
C: N	<b>0.422**</b>	<b>0.710***</b>	<b>-0.861***</b>	<b>-0.844***</b>	<b>-0.839***</b>	<b>-0.830***</b>	<b>-0.976***</b>	<b>-0.903***</b>	<b>0.517***</b>	-0.105	<b>-0.672***</b>
C: P	<b>0.500***</b>	<b>0.720***</b>	<b>-0.893***</b>	<b>-0.791***</b>	<b>-0.798***</b>	<b>-0.783***</b>	<b>-0.953***</b>	<b>-0.860***</b>	<b>0.594***</b>	-0.026	<b>-0.718***</b>
N: P	<b>0.627***</b>	<b>0.690***</b>	<b>-0.890***</b>	<b>-0.605***</b>	<b>-0.637***</b>	<b>-0.610***</b>	<b>-0.818***</b>	<b>-0.689***</b>	<b>0.710***</b>	0.139	<b>-0.762***</b>
MBC	<b>0.301*</b>	<b>-0.357*</b>	-0.033	<b>0.519***</b>	<b>0.368*</b>	<b>0.401**</b>	<b>0.437**</b>	<b>0.449**</b>	0.263	<b>0.598***</b>	0.088
MBN	<b>0.541***</b>	-0.179	-0.233	<b>0.620***</b>	<b>0.527***</b>	<b>0.548***</b>	<b>0.402**</b>	<b>0.527***</b>	<b>0.470**</b>	<b>0.743***</b>	-0.157
MBP	-0.171	<b>-0.314*</b>	<b>-0.384**</b>	-0.177	-0.198	-0.247	-0.065	-0.199	-0.207	0.040	0.290
DOC	<b>-0.475**</b>	0.036	0.134	<b>-0.362*</b>	-0.233	-0.275	-0.209	-0.293	<b>-0.481**</b>	<b>-0.542***</b>	0.209
硝态氮	0.216	<b>0.337*</b>	<b>-0.803***</b>	<b>-0.583***</b>	<b>-0.547***</b>	<b>-0.578***</b>	<b>-0.644***</b>	<b>-0.631***</b>	0.235	-0.035	<b>-0.330*</b>
铵态氮	<b>0.512***</b>	<b>0.464**</b>	-0.288	-0.100	-0.132	-0.100	<b>-0.308*</b>	-0.155	<b>0.559***</b>	0.204	<b>-0.554***</b>
速效磷	<b>0.712***</b>	<b>0.643***</b>	<b>-0.862***</b>	<b>-0.435**</b>	<b>-0.466**</b>	<b>-0.439**</b>	<b>-0.697***</b>	<b>-0.533***</b>	<b>0.765***</b>	0.276	<b>-0.774***</b>

1) 黑体字表示相关性呈显著或极显著相关关系; \* 表示显著性水平 0.05; \*\* 表示显著性水平 0.01; \*\*\* 表示显著性水平 0.001

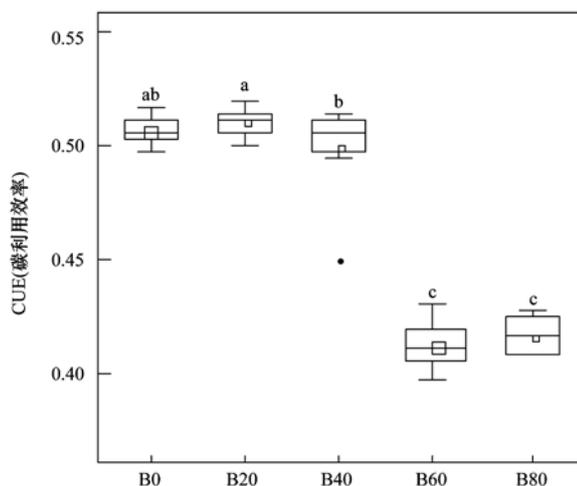


图2 不同处理下土壤微生物群落的碳利用效率 (CUE)

Fig. 2 Box plots showing CUE of microbial communities under different biochar application amounts

MBN、硝态氮和速效磷表现出显著或极显著相关关系, DOC 与 BG、铵态氮与 LAP 呈显著相关关系, C: N-酶和 N: P-酶与含水量、容重、SOC、TN、TP、C: N、C: P、N: P、铵态氮和速效磷表现出显著或极显著相关关系, C: N-酶和 C: P-酶与 MBN 和 DOC 呈极显著相关关系。

将矢量长度、矢量角度和 CUE 与土壤物理化学指标进行相关性分析表明(表 4), 矢量长度(碳限制)、矢量角度(磷限制)和 CUE 均与土壤含水量、容重、SOC、TP、C: N、C: P、N: P 和速效磷呈极显著相关关系;且矢量角度和矢量长度均与 CUE 呈极显著负相关关系;DOC 与矢量长度(碳限制)呈极显著负相关。

## 2.5 土壤特性对微生物代谢碳磷限制以及 CUE 的影响

PLS-PM 分析确定了土壤物理化学特性和微生物生物量对微生物代谢碳和磷限制以及 CUE 的直接和间接影响。

施加生物炭改变了土壤养分供应及元素计量比等土壤理化特性, PLS-PM 分析表明, 相对于土壤碳氮磷含量及其计量比(-0.045), 活性组分含量(-0.191)对于矢量长度(碳限制)的影响较大[图 3(a)];而对于矢量角度(磷限制)而言, 土壤碳氮磷含量及其计量比(0.763)对矢量角度产生了直接的极显著正效应[图 3(b)]。

此外, PLS-PM 分析还表明[图 3(c)], 微生物代谢碳磷限制(-0.326)和土壤碳氮磷含量及其计量比(-0.410)对微生物 CUE 产生了极显著的负效应, 而且活性组分含量(0.630)对微生物代谢养分限制产生了极显著正效应。

## 3 讨论

### 3.1 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响

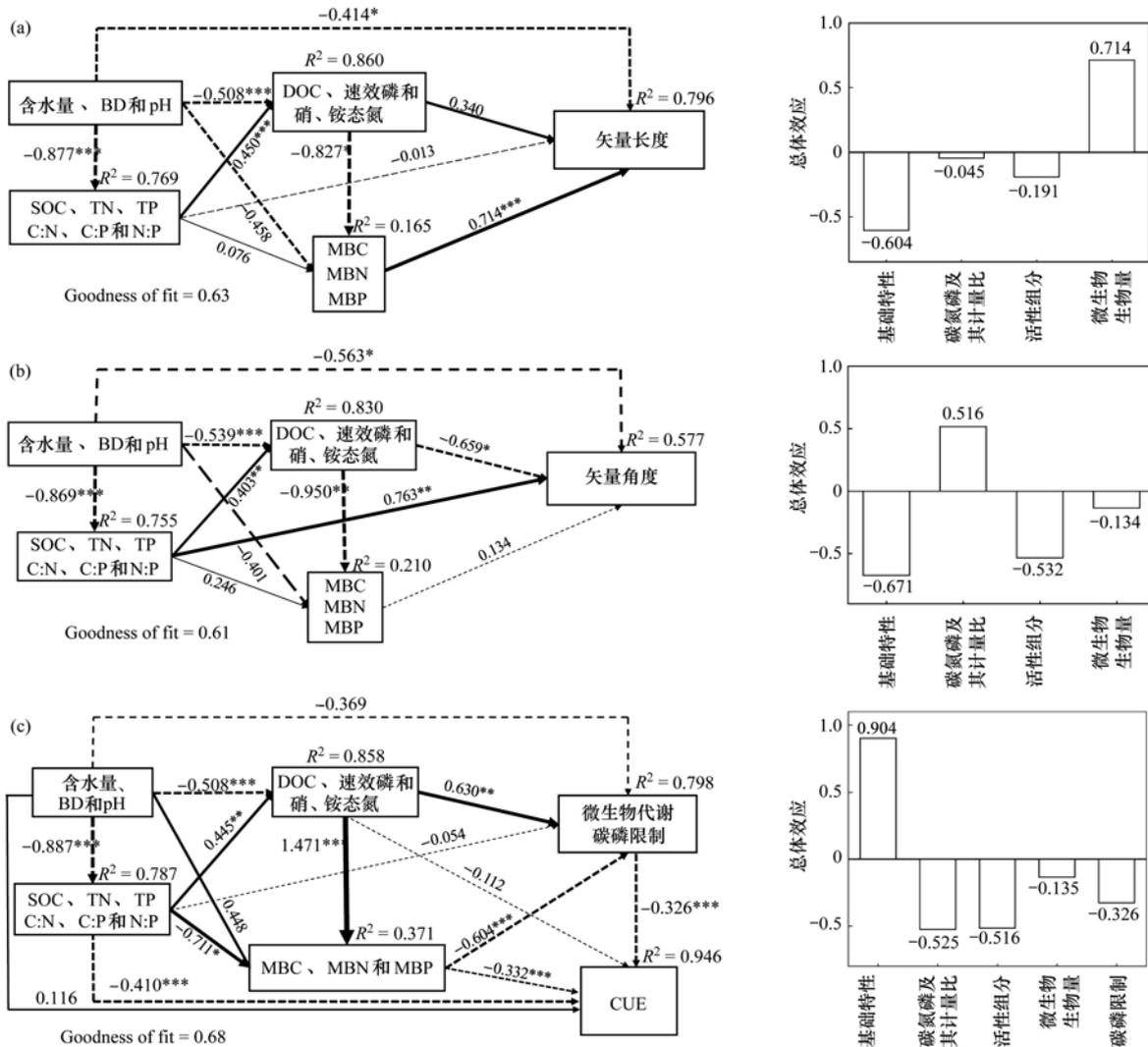
生物炭的施加均显著降低了 5 种胞外酶的活性, 不施加生物炭时胞外酶活性最高, 表明其微生物 C、N 和 P 的代谢水平最高。生物炭对微生物代谢活性的影响可能是由于生物炭改变了土壤理化特性和养分状况<sup>[7,8,9]</sup>, 进而影响微生物对养分的利用, 造成土壤微生物的生物量和群落结构发生变化<sup>[15]</sup>, 而对胞外酶活性产生影响。

生物炭对土壤碳氮磷含量及其元素计量比产生了不同程度的影响(表 2), 而且相关性分析显示 SOC、TN 和 TP 含量及其化学计量比与胞外酶活性和生态酶化学计量存在极显著相关关系(表 4), 表明土壤碳氮磷与胞外酶活性和生态酶化学计量的变化存在紧密联系。Sinsabaugh 等<sup>[16, 17]</sup>的研究表明, 土壤胞外酶活性和生态酶化学计量通常受土壤养分状况的影响, 当养分利用率低时, 微生物可以分泌更多相关酶来满足养分需求<sup>[16]</sup>, 并且土壤养分含量会通过改变可利用的底物和 C、N、P 的化学计量而对胞外酶活性和生态酶化学计量产生重大影响<sup>[18]</sup>。因此, 笔者认为生物炭的添加通过改变土壤营养供应状况极大地影响了土壤微生物的代谢活动和养分需求, 从而对土壤胞外酶活性和生态酶化学计量产生影响, 甚至可能会影响农田生态系统的稳定性。

### 3.2 不同生物炭施用量条件下微生物的碳磷限制

长期的生态观测和试验表明, 磷是许多生态系统的主要限制元素<sup>[19]</sup>。本研究中微生物群落同样受到磷的限制。在 5 个生物炭处理(所有矢量角度 > 45°)下, 微生物群落均受到磷的限制[图 1(a)]。磷限制分别在 B20 和 B80 时达到最低和最高值[图 1(c)]。

生物炭施加 7 a 后仍显著提高了土壤碳氮含量, 而土壤总磷甚至有所降低(表 2), 这就会对土壤养分计量比(C: N、C: P 和 N: P)产生很大影响, PLS-PM 分析表明, 土壤碳氮磷及其计量比对矢量角度(磷限制)产生了极显著的正效应, 活性碳氮磷组分对矢量角度产生了显著负效应[图 3(b)], 说明生物炭的施加一方面通过提高土壤碳氮含量及元素计量比加剧了土壤微生物代谢的磷限制, 另一方面通过调节速效养分含量缓解了磷的限制。元素化学计量学可以强烈影响微生物群落的结构和活性<sup>[20, 21]</sup>。Delgado-Baquerizo 等<sup>[4]</sup>的研究表明, 土壤元素化学计量的变化(C: N: P)驱动了细菌多样性和组成, 而且土壤元素化学计量也可以控制丛枝菌根与根源非菌根真菌的竞争能力<sup>[22]</sup>。因此, 笔者认为过量生物炭的施加在一定程度上加剧了磷的限制, 主要是由于生物炭改变了



偏最小二乘路径建模(PLS-PM)解释了土壤物理化学特性和微生物生物量影响土壤微生物代谢养分限制和 CUE 的主要途径;实线和虚线箭头分别表示因果关系的正负( $P < 0.05$ );箭头上的数字表示标准化路径系数,星号表示显著性; $R^2$  表示由模型解释的因变量的方差;基础特性包括含水量、容重和 pH;碳氮磷及其计量比包括 SOC、TN、TP、C:N、C:P 和 N:P;活性组分包括 DOC、硝、铵态氮和速效磷;微生物生物量包括 MBC、MBN 和 MBP;碳磷限制包括矢量角度(磷限制)和矢量长度(碳限制);\* 表示显著性水平 0.05; \*\* 表示显著性水平 0.01; \*\*\* 表示显著性水平 0.001

图 3 偏最小二乘路径建模分析

Fig. 3 Partial least-squares path modelling (PLS-PM)

土壤碳氮磷含量及其计量比所造成的。

本研究中微生物群落同样受到碳的限制[图 1(a)],分别在 B20 和 B80 时所受限制最低和最高[图 1(b)].不同生物炭施加量对土壤胞外酶活性和微生物生物量有强烈影响(表 2 和表 3),这表明生物炭通过影响微生物群落结构和土壤养分供应而间接影响微生物代谢养分限制.施加生物炭各处理 SOC 含量的变化会对微生物碳源的供应产生影响<sup>[15]</sup>.

在本研究中,B80 的 SOC 含量显著高于其他处理(表 2),理论上讲,应该具有更多的碳源来供应微生物代谢,微生物群落所受碳限制也会随之减小.但本研究的结果表明随着生物炭施加量的持续增加土壤微生物代谢受到的碳限制愈加严重,这一方面可能是由于生物炭具有碳含量高、芳香化结构复杂和

固有的化学惰性特征<sup>[23]</sup>,属惰性碳库,在土壤环境中具有较高的化学和微生物稳定性<sup>[24]</sup>,此外,生物炭的施用可能改变了土壤原有有机质的组成,形成比较稳定的土壤有机质<sup>[25]</sup>,而且本研究得出 DOC 的含量并没有随生物炭施加量的增加而持续增加(表 2),对于微生物代谢碳的限制,DOC 的影响最大,因为它的含量决定了土壤碳的有效性.进一步分析表明,DOC 与矢量长度(碳限制)呈极显著负相关(表 4),随着 DOC 含量的增加微生物代谢所受碳限制减弱,而且铵态氮和速效磷与矢量长度呈极显著正相关关系,也就是说随着铵态氮和速效磷含量的增加,根据养分平衡原理土壤微生物代谢所受碳限制增强.PLS-PM 分析也表明土壤碳氮磷及其计量比和活性组分均对微生物代谢碳限制产生了负效应

[图 3(a)],且速效养分对碳限制的影响较大。

另一方面,最可能的解释就是微生物磷限制加剧了微生物代谢的碳限制,线性回归分析也显示微生物代谢碳限制和磷限制呈正相关[图 1(d)].前人的研究表明,如果磷成为相对受限的元素,则微生物群落可能会消耗更多的碳和氮来生产和排泄与磷代谢相关的酶<sup>[26]</sup>.土壤酶活性与土壤理化性质之间的强相关性(表 4)还表明,微生物可以通过在酶促合成过程中优化碳氮磷的分配来获得相对稀缺的资源(磷)<sup>[20]</sup>.另外,微生物所需要的大部分磷来自土壤有机质的分解<sup>[27]</sup>,因此,微生物对磷的需求可以诱导碳相关酶的分泌和微生物代谢的碳限制,因为微生物分泌更多的碳摄取酶来水解有机物,并减轻土壤磷的限制.因此,土壤磷的限制在一定程度上控制着微生物的碳代谢。

Liang 等<sup>[28]</sup>的研究表明生物炭可增强土壤生物活性和团聚性,改善土壤结构,提高土壤持水特性,而土壤含水量和容重也是影响生物炭分解和微生物活动的重要因素,从而影响微生物的代谢和养分吸收。

因此,笔者认为适量的生物炭添加有助于缓解壤土土壤微生物代谢所受的养分限制,但过量施加生物炭会影响微生物代谢养分供应水平继而加剧这种限制。

### 3.3 微生物代谢碳和磷限制对微生物 CUE 的影响

土壤微生物代谢所受碳和磷限制会对生态平衡产生一定影响,这种限制可以加速土壤有机质的分解,提供有效的碳和磷,刺激土壤碳的释放<sup>[20]</sup>.地球系统模型还表明,氮和磷限制在一定程度上减少了土壤碳汇,使得一些区域性碳汇变成了净碳源<sup>[29]</sup>.许多生态系统都已证明了微生物碳代谢所受的磷限制,该限制增加了溶解性有机物的微生物矿化作用,并增加了土壤 CO<sub>2</sub> 的外流<sup>[30]</sup>.因此,微生物的代谢限制极大地影响了土壤碳的固存。

为了定量评估微生物代谢限制对土壤碳循环的生态影响,本研究引入了关键性指标土壤微生物 CUE,作为将土壤微生物代谢与有机物分解联系起来的定量指标。

土壤微生物 CUE 在施加不同量的生物炭过程中变化显著,且随施加量的增加在 B40 和 B60 之间发生剧烈降低.土壤碳氮磷及其化学计量比可以通过改变微生物生物量和微生物代谢限制来显著影响微生物的 CUE.而且由于分解者细胞需要保持碳和营养成分的平衡以及微生物生物量的稳态,元素化学计量(尤其是碳)的波动将会对土壤微生物的生长和呼吸产生影响<sup>[31,32]</sup>,这会进一步改变 CUE。

本研究将微生物代谢所受碳磷限制与微生物

CUE 联系起来发现,微生物 CUE 与微生物碳磷限制呈极显著负相关(表 4),这表明它们具有高度依赖性.通过 PLS-PM 进一步分析还表明[图 3(c)],微生物碳磷限制对微生物 CUE 具有强烈的负效应.随着微生物代谢碳限制的增加,CUE 的下降可能归因于微生物从生长到维持呼吸的转变,以及随着有机质分解的加快,增加了碳对微生物产生酶的投入<sup>[31]</sup>.微生物代谢限制是代谢的重要特征,总体而言,它通过以下方式影响微生物 CUE,可直接利用的土壤养分直接参与微生物的生长和代谢,当可利用的营养不足时,例如本研究区域的碳和磷限制,微生物必须首先分解复杂化合物<sup>[33]</sup>,这就需要大量酶促反应降解化合物,从而降低了转化为新生物质的效率.另外,各种底物需要不同的代谢途径才能被微生物完全吸收<sup>[34]</sup>,这可能导致单位碳的转化率更低.因此,该过程将大大抵消固定在土壤中的一些碳,使其通过呼吸作用以二氧化碳形式从土壤中大量释放。

## 4 结 论

(1)本研究通过生态酶化学计量学分析表明,研究区各处理土壤微生物均受磷的限制;

(2)过量施用生物炭使土壤元素化学计量失衡是导致土壤微生物代谢磷限制加剧的重要因素,继而诱导了微生物碳限制的增强和 CUE 的降低;

(3)当生物炭施加量为 20 t·hm<sup>-2</sup>时,土壤微生物代谢所受碳和磷限制相对最低,且 CUE 最高,对于调节微生物代谢、维持生态功能和减少土壤微生物二氧化碳排放最优。

### 参 考 文 献:

- [1] Cui Y X, Zhang Y L, Duan C J, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation decreases the nitrogen cycling potential of soils in semi-arid agricultural ecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, **197**: 104463.
- [2] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the north-south transect in eastern China (NSTEC)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**: 152-163.
- [3] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Natural grassland as the optimal pattern of vegetation restoration in arid and semi-arid regions: evidence from nutrient limitation of soil microbes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 388-397.
- [4] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Khachane A N, *et al.* It is elemental: soil nutrient stoichiometry drives bacterial diversity [J]. *Environment Microbiology*, 2017, **19**(3): 1176-1188.
- [5] 祁乐,高明,郭晓敏,等.生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2351-2359. Qi L, Gao M, Guo X M, *et al.* Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil[J]. *Environment Science*, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- [6] Xie T, Reddy K R, Wang C W, *et al.* Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*,

- 2015, **45**(9): 939-969.
- [ 7 ] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3634-3641.  
Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of Loess soil[J]. Environment Science, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [ 8 ] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 1969-1976.  
Shang J, Geng Z C, Zhao J, *et al.* Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(7): 1969-1976.
- [ 9 ] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3388-3396.  
Li Q Q, Xu C Y, Geng Z C, *et al.* Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil [J]. Environment Science, 2019, **40**(7): 3388-3396.
- [10] Tapia-Torres Y, Elser J J, Souza V, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry at the extremes: how microbes cope in an ultra-oligotrophic desert soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **87**: 34-42.
- [11] 高雨秋, 戴晓琴, 王建雷, 等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(3): 258-272.  
Gao Y Q, Dai X Q, Wang J L, *et al.* Characteristics of soil enzymes stoichiometry in rhizosphere of understory vegetation in subtropical forest plantations [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, **43**(3): 258-272.
- [12] Duan C J, Razavi B S, Shen G T, *et al.* Deciphering the rhizobium inoculation effect on spatial distribution of phosphatase activity in the rhizosphere of alfalfa under copper stress[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **137**: 107574.
- [13] Deng L, Peng C H, Huang C B, *et al.* Drivers of soil microbial metabolic limitation changes along a vegetation restoration gradient on the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2019, **353**: 188-200.
- [14] 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.
- [15] 周凤, 耿增超, 许晨阳, 等. 生物炭用量对壤土土壤微生物量及碳源代谢活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(8): 1277-1289.  
Zhou F, Geng Z C, Xu C Y, *et al.* Effect of biochar addition on soil microbial biomass and metabolic activities of carbon sources in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(8): 1277-1289.
- [16] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [17] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [18] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition[J]. Biogeochemistry, 2014, **117**(1): 23-37.
- [19] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 等. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 4965-4976.  
Chen M L, Chen H, Mao Q G, *et al.* Effect of nitrogen deposition on the soil phosphorus cycle in forest ecosystems: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 4965-4976.
- [20] 周正虎, 王传宽. 微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(6): 620-630.  
Zhou Z H, Wang C K. Responses and regulation mechanisms of microbial decomposers to substrate carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, **40**(6): 620-630.
- [21] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **116**: 11-21.
- [22] Chagnon P L, Bradley R L. Evidence that soil nutrient stoichiometry controls the competitive abilities of arbuscular mycorrhizal vs. root-borne non-mycorrhizal fungi [J]. Fungal Ecology, 2013, **6**(6): 557-560.
- [23] 叶协锋, 周涵君, 于晓娜, 等. 热解温度对玉米秸秆炭产率及理化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(5): 1268-1275.  
Ye X F, Zhou H J, Yu X N, *et al.* Physicochemical properties and yields of corn-stalk-biochar under different pyrolyzed temperatures[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(5): 1268-1275.
- [24] 高诚祥, 刘玉学, 汪玉瑛, 等. 生物炭的稳定性及其对矿物改性的响应机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 3245-3251.  
Gao C X, Liu Y X, Wang Y Y, *et al.* Stability of biochar and the mechanisms underlying its response to mineral modification: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(9): 3245-3251.
- [25] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(3): 509-517.  
Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(3): 509-517.
- [26] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems[J]. New Phytologist, 2012, **193**(3): 696-704.
- [27] Ru J Y, Zhou Y Q, Hui D F, *et al.* Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(3): 1001-1011.
- [28] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, **41**(2): 206-213.
- [29] Exbrayat J F, Pitman A J, Zhang Q, *et al.* Examining soil carbon uncertainty in a global model: response of microbial decomposition to temperature, moisture and nutrient limitation [J]. Biogeosciences, 2013, **10**(11): 7095-7108.
- [30] Cui Y X, Fang L C, Deng L, *et al.* Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **658**: 1440-1451.
- [31] Manzoni S, Taylor P, Richter A, *et al.* Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. New Phytologist, 2012, **196**(1): 79-91.
- [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] Cui Y X, Fang L C, Gao X B, *et al.* Responses of soil microbial communities to nutrient limitation in the desert-grassland ecological transition zone[J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 45-55.
- [34] Van Hees P A W, Jones D L, Finlay R, *et al.* The carbon we do not see-the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils; a review [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(1): 1-13.

## CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai; Using Hourly Resolved PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition Data .....	ZHOU Min (1997)
Impact of Differences in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles .....	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis .....	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas .....	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Linyi .....	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China .....	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants .....	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM <sub>2.5</sub> Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model .....	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM <sub>2.5</sub> Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention .....	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data .....	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment .....	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir .....	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir .....	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation .....	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake .....	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China .....	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios .....	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir .....	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir .....	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period .....	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir .....	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River .....	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer .....	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China .....	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment .....	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i> .....	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China .....	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning .....	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed .....	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff .....	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions .....	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> System for Degradation of Benzoic Acid .....	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations .....	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou .....	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers .....	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers .....	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR) .....	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions .....	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation .....	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity .....	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils .....	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization .....	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties .....	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland .....	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil .....	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N <sub>2</sub> O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills .....	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain .....	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields .....	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils .....	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest .....	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments .....	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013 .....	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)