

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.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征

宁玉菲^{1,2}, 魏亮^{1,2}, 魏晓梦^{1,2}, 祝贞科^{1*}, 袁红朝¹, 葛体达¹, 吴金水^{1,2}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤中碳(C)和氮(N)等底物的可利用性决定着微生物生长代谢,同时影响土壤胞外酶活性. 为探讨土壤酶活性对土壤原有有机质变化的响应,本试验选取了长期定位试验田的4种施肥处理水稻土[无肥对照(CK)、单施化肥(NPK)、有机肥+化肥配施(OM)和秸秆还田+化肥配施(ST)],通过0、4、8和12个月的分段培养获取了具有不同可利用性C、N含量梯度的土壤,分析参与土壤碳氮转化过程的关键酶 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性与可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH_4^+ -N)、土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量的关系. 结果表明,OM和ST处理对土壤中DOC含量的提高更显著($P < 0.01$),是CK和NPK处理的2~3倍. NPK、OM和ST处理的MBC含量、BG和NAG酶活性高于CK处理. 所有施肥处理中,随着可利用性底物(DOC和 NH_4^+ -N)含量的升高,BG和NAG活性整体呈稳定或下降趋势,MBC和MBN含量变化趋势与BG和NAG相同. 施肥处理和培养时间以及二者的交互作用极显著影响($P < 0.01$)土壤DOC、 NH_4^+ -N、MBC和MBN的含量. 回归分析显示,OM处理MBC/MBN值与DOC/ NH_4^+ -N值之间正相关($P < 0.05$);ST处理的 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 值和DOC/ NH_4^+ -N值之间负相关($P < 0.01$),这表明稻田土壤可利用性底物浓度是影响胞外酶活性的关键因子,且微生物量的碳氮计量比受控于土壤中底物的碳氮计量关系. 该结果对深入研究稻田土壤中胞外酶活性变化规律,调节稻田土壤碳氮平衡,提高稻田土壤肥力具有一定指导意义.

关键词: 胞外酶活性; 底物可利用性; 碳氮计量比; 水稻土; 长期施肥

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2852-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909140

Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management

NING Yu-fei^{1,2}, WEI Liang^{1,2}, WEI Xiao-meng^{1,2}, ZHU Zhen-ke^{1*}, YUAN Hong-zhao¹, GE Ti-da¹, WU Jin-shui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The availability of carbon (C), nitrogen (N), and other substrates in soil determines the growth and metabolism of microorganisms and affects the activity of extracellular enzymes. To study the activities of β -1,4-glucosidase (BG) and β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG) in response to C and N availability, samples that underwent four treatments—non-fertilization (CK), chemical fertilizer (NPK), combination of organic manure and chemical fertilizer (OM), and mixture of straw and chemical fertilizer (ST)—were collected from long-term fertilization paddy soil and incubated for 0, 4, 8, and 12 months to obtain soil with different C and N availability gradients. The results showed that the dissolved organic carbon (DOC) content of OM and ST treatment samples was 2–3 times higher than that of CK and NPK treatment samples. With the increase of DOC and ammonium (NH_4^+ -N) contents, the activities of BG and NAG and the contents of microbial biomass C (MBC) and N (MBN) showed no increase during incubation within each treatment. Fertilization treatments, incubation time, and their interaction are crucial factors varying the contents of DOC, NH_4^+ -N, MBC, and MBN among different fertilization treatments ($P < 0.01$). There was a positive correlation between MBC/MBN and DOC/ NH_4^+ -N of OM treatment ($P < 0.05$) and a negative relationship between $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ and DOC/ NH_4^+ -N of ST treatment ($P < 0.01$), indicating that the availability of substrates played a key role in the potential activity of extracellular enzymes in paddy soil, and the carbon-nitrogen ratio of microbial biomass was controlled by the C/N stoichiometry of substrates in soil. The results have a certain guiding significance for further study on the variation of extracellular enzyme activity in paddy soil, regulating the balance of carbon and nitrogen, and improving the fertility of paddy soil.

Key words: extracellular enzyme activity; substrate availability; C/N stoichiometry; paddy soil; long-term fertilization

收稿日期: 2019-09-15; 修订日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430860, 41771334); 湖南省自然科学基金优秀青年基金项目(2019JJ30028); 湖南省自然科学基金创新群体项目(2019JJ10003)

作者简介: 宁玉菲(1993~),女,硕士,主要研究方向为土壤生态, E-mail: ningyufei18@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhuzhenke@isa.ac.cn

土壤中碳与养分元素的含量与可利用性影响土壤微生物的丰度与活性,而土壤微生物又可通过自身群落结构改变和胞外酶的分泌等过程,反馈调控土壤元素循环过程.土壤中的酶驱动物质循环,在养分周转和肥力提升等方面发挥着重要作用.土壤碳(C)和氮(N)等元素大部分储存在有机质中,不能被植物和微生物直接利用,微生物通过分泌胞外酶将复杂化合物降解为水溶性小分子,供自身和植物生长代谢^[1,2].有机质转化为可利用态底物的过程受土壤酶活性调控.一方面,土壤底物可利用性的变化直接影响微生物生物量^[3,4],进而影响多种酶的合成与分泌.例如,土壤中可溶性有机碳的变化可能导致微生物群落结构的改变,进而改变土壤酶活性^[5,6].另一方面,土壤可利用态底物化学计量比影响微生物代谢过程中的养分和能量分配,改变土壤酶活性的计量关系.计量学理论认为,微生物元素组成具有内稳性^[7],即当土壤中可利用态底物计量比无法满足微生物需求时,微生物能够通过分泌相应的酶从土壤有机质中获取养分和能量,以维持自身元素计量学稳定.汤珍珠^[8]的研究发现同时向土壤中添加葡萄糖和 N、P、S 等养分元素,能够有效缓解养分限制,使得 β -葡萄糖苷酶(BG)和 β -1,4-*N*-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性不断降低.

目前,关于土壤酶活性与底物可利用性的关系研究多是通过外源添加调节底物可利用性,这种方法虽然简便但存在一定的问题.一方面,外源底物添加后会对土壤中原有有机质产生激发效应^[9~11],进而导致土壤酶活性对土壤原有有机质变化的响应不明确.由于微生物对 C 源和养分需求的差异,短期内大量易利用态底物的投入导致土壤微生物群落快速改变,扰乱了土壤原有生态结构,不利于土壤中真实生态规律的揭示.另一方面,外源添加的葡萄糖、氨基酸等小分子化合物通常比土壤有机质库具有更高的生物可利用性,被微生物优先利用,由此引发的土壤酶活性变化无法反映微生物对土壤原有底物可利用性的响应.有研究表明,在没有外源底物输入时,随着培养时间的延长,土壤中易利用态底物能够被消耗到不同水平^[12~14],但土壤酶活性与土壤原有底物可利用性的关系仍不清楚,特别是针对稻田土壤.

全球亚热带地区的淹水稻田面积约 1 600 万 hm^2 ^[15],厌氧环境条件下水稻土含有丰富的小分子有机物^[16],微生物通过代谢这些物质驱动着稻田土壤生物地球化学循环过程,因此相比于旱地土壤,稻田土壤胞外酶活性与底物可利用性的关系具有相对复杂性.为探明土壤酶活性对土壤 C 和 N 可利用性的响应特征,本研究选用 4 种长期施肥处理的水稻土,以 DOC 和 NH_4^+ -N 表征可利用性底物,分别培养 0、4、8 和 12 个月,得到具有 C 和 N 可利用性梯度的土壤,同时分析土壤中 BG 和 NAG 活性对 C 与 N 可利用性和微生物生物量的响应.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验土壤样品采自湖南省宁乡县长期定位施肥试验站(112°18'E, 28°07'N).该试验站始于 1986 年,采用早稻-晚稻-冬闲种植制度.该地区为典型的亚热带湿润气候,年均气温 16.8℃,年均降雨量 1 553.7 mm,年蒸发量 1 353.9 mm,年均无霜期 274 d 左右,平均海拔 36.1 m.本研究选取田间试验的 4 种长期施肥处理:①无肥对照处理(CK):不施加任何肥料;②单施化肥处理(NPK):根据田间监测点土壤氮、磷、钾供应状况和作物预期需求量,每公顷分别施用 60 kg 氮[(NH_4)₂SO₄]、30 kg 磷(P₂O₅)和 60 kg 钾(K₂O);③有机肥+化肥配施处理(OM):以 NPK 化肥处理的施氮量为标准,施加有机肥鸡粪代替 NPK 化肥处理中 30% 的施氮量;④秸秆还田+化肥配施处理(ST):NPK 化肥处理的施氮量为标准,水稻收获后秸秆全量还田,早季稻秸秆还田量为 2 775 kg·hm⁻²,晚季稻秸秆还田为 3 600 kg·hm⁻²,若总氮量不足用化肥补足.

1.2 试验的设计和样品采集

2016 年 6 月 30 日早稻收获后,每个小区随机选取 5 个点,按 S 型路线采集耕作层(0~20 cm)土壤,充分混匀后剔除其中可见的动植物残体、石块等杂物.将采集的新鲜土样分成 2 份带回实验室,一部分自然风干分别过 2.00 mm 和 0.149 mm 筛用于土壤基本理化性质(表 1)测定,其余风干后全部过 2.00 mm 筛备用,得到 4 种不同施肥土壤样品.

表 1 供试土壤的理化性质¹⁾

Table 1 Characteristics of tested soils in this study

处理	黏粒/%	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/g·kg ⁻¹	速效磷/g·kg ⁻¹
CK	8.80b	6.26	21.87c	1.61b	161.41b	4.45c
NPK	10.09a	6.59	22.70c	1.66b	180.95ab	9.25b
ST	7.25d	5.85	32.23a	2.46a	250.43a	107.63a
OM	7.47c	5.89	27.02b	2.18a	199.05ab	10.01b

1) 不同小写字母表示不同施肥处理间同一土壤理化性质差异显著

1.3 土壤室内模拟培养试验

将4种不同施肥土壤充分搅匀后,均分为4份,每份60 g(以干土计),并将每份分为3个重复分别置于500 mL厌氧瓶中,共计48瓶.先向第一份土壤中加入一定量(土水比1:1.5)无菌水,密封于恒温(25℃)黑暗条件下培养,于开始培养后的第4、8和12个月分别向第2、3和4份中加入一定量(土水比1:1.5)无菌水,分别得到培养12、8、4和0个月的土壤.在最后一份添加灭菌水一周后进行破坏性取样测定土壤胞外酶最大潜在酶活性和碳氮相关指标.

1.4 测定指标与方法

土壤pH采用Mettler-toledo 320 pH计(FE20K,瑞士)测定(土水质量比1:2.5);土壤全氮(TN)和有机碳(SOC)采用C/N分析仪(Vario MAX C/N,德国)测定^[17];土壤活性有机碳(DOC)含量采用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液提取,有机碳分析仪(岛津Vwp,日本)测定,同时用流动注射仪(Fiastar5000,瑞典福斯)测定土壤碱解氮和铵态氮含量(NH₄⁺-N);土壤速效磷(Olsen-P)采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃溶液浸提,钼锑抗比色-紫外分光光度计测定;土壤微生物生物量碳和氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸培养法^[18],用熏蒸土壤DOC或NH₄⁺-N减去未熏蒸土壤中对应含量,换算系数为K_c=0.45.两种土壤酶活性(BG与NAG)均采用96微孔酶标板荧光分析法^[19],多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL, Thermo)在激发波长365 nm、发射波长450 nm的条件下测定,最终用米氏方程拟合得到土壤酶的最大活性潜势($V_{\max}$)、土壤酶亲和力(K_m)和催化效率(K_a).

1.5 数据处理与统计分析

运用Microsoft Excel 2010对所有数据进行整理,平均值、标准差和标准误的求算;用SigmaPlot 12.5绘图;用SPSS 21.0软件包中的单因素方差分析(One-way ANOVA)的最小显著差数法(LSD, $P < 0.05$)分析不同施肥处理以及不同培养时期土壤可利用性碳氮含量、微生物生物量以及各酶动力参数的差异显著性;运用Amos 21绘制结构方程模型评估施肥处理、培养时间、土壤可利用性碳氮含量、微生物生物量碳氮含量与土壤胞外酶活性间存在的直接和间接关系.

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤易利用态碳氮和微生物生物量碳氮随培养时间的变化规律

水稻土淹水培养后,4个不同施肥土壤的DOC

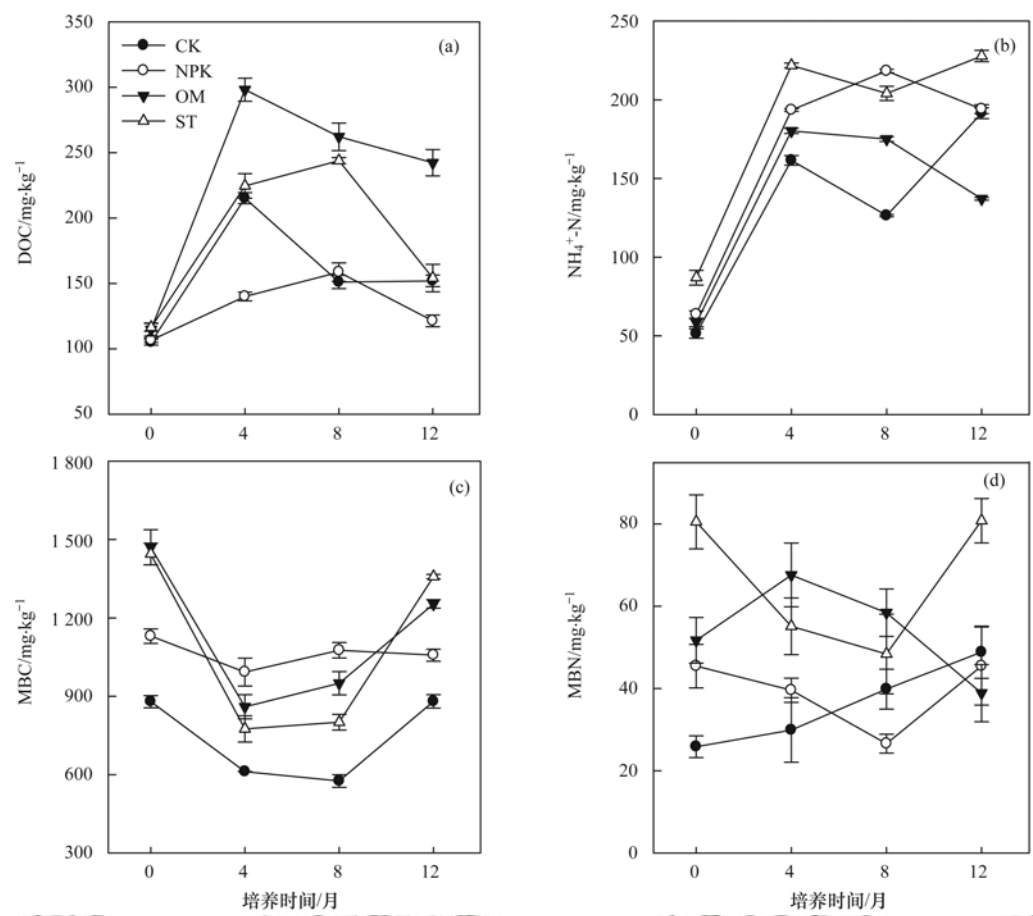
含量整体表现为先增加后降低的趋[图1(a)].其中CK、NPK和ST处理在12个月淹水培养后其DOC含量约为121.44~154.12 mg·kg⁻¹,接近培养开始时的含量.OM处理土壤的DOC含量显著高于其他处理的土壤($P < 0.05$),见表2,且在培养4个月时达到最高(298.21 mg·kg⁻¹),而后逐渐降低至培养12个月后的242.35 mg·kg⁻¹.NPK处理的DOC含量最低,在培养4个月和12月后其含量约为OM处理的1/2.土壤中NH₄⁺-N含量在淹水培养初期快速增加,培养4个月时CK、NPK、OM和ST处理的NH₄⁺-N含量分别为161.59、193.54、180.34和221.91 mg·kg⁻¹[图1(b)].NPK和ST处理的NH₄⁺-N含量在4~12个月的培养期内较稳定,并高于CK和OM处理,12个月时,其NH₄⁺-N含量是OM处理的1.4和1.7倍.

水稻在淹水培养期间内,NPK处理的MBC含量基本维持稳定,CK、OM和ST处理在培养初期(0~4个月),MBC含量急剧下降,而培养后期(8~12个月)急剧升高,12个月时,其MBC含量分别恢复到0个月的100%、85%和94%[图1(c)].淹水培养0个月和12个月时,OM和ST处的MBC含量显著高于CK和NPK处理($P < 0.05$),见表2.NPK、OM和ST处理MBN含量随培养时间呈不同变化规律,但培养12个月时,3个处理的MBN含量均恢复到0个月时的含量水平[图1(d)].0个月时,OM和ST处理MBN含量显著高于CK和NPK处理,12个月时ST处理MBN含量最高(80.33 mg·kg⁻¹),OM处理的MBN含量最低(38.63 mg·kg⁻¹).

2.2 培养过程中土壤中BG和NAG的动力学特征

淹水培养期间,各施肥处理BG最大酶活性潜势($V_{\max}$)整体呈下降趋势[图2(a)].培养初期,OM和ST处理BG的 $V_{\max}$ 急剧下降,12个月时OM处理 $V_{\max}$ 降到初始水平,为51.79 nmol·(kg·h)⁻¹,ST处理的 $V_{\max}$ 降为原来的67%.NPK处理BG的 $V_{\max}$ 12个月时降为0个月时的1/2.培养0个月时,各处理土壤BG的 $V_{\max}$ 呈现ST>NPK>OM>CK.NAG的 $V_{\max}$ 随培养时间的变化趋势与BG相似,整体呈下降趋势[图2(b)].淹水培养0个月时,ST处理NAG的 $V_{\max}$ 显著高于其他施肥处理($P < 0.05$).

淹水培养期间,BG和NAG的 K_m 整体呈下降或平稳趋势(图2).培养0个月时,NPK和OM处理BG的底物亲和性(K_m)显著高于CK和ST,而后,NPK处理的 K_m 持续下降,12个月时降为0个月的1/7.培养0个月时,各处理NAG的 K_m 呈现为OM>CK>NPK>ST.培养开始后,CK、NPK和OM处理NAG的 K_m 持续降低,12个月时降为原来的27%、



CK:不施肥,NPK:单施化肥,OM:有机肥配施化肥,ST:秸秆还田配施化肥,下同
图1 不同施肥处理的水稻土在4个培养时间点的DOC、NH₄⁺-N、MBC和MBN的含量

Fig. 1 Contents of DOC, NH₄⁺-N, MBC, and MBN in paddy soil with four incubation times in four fertilizer treatments

表2 4个培养时间不同施肥处理土壤易利用态碳氮含量和微生物生物量碳氮含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Contents of DOC, NH₄⁺-N, MBC, and MBN in paddy soil with four incubation times in four fertilizer treatments/mg·kg⁻¹

项目	培养时间/月	CK	NPK	OM	ST
DOC	0	105.08 ± 2.17Cd	106.69 ± 1.79Db	114.85 ± 5.00Cab	116.43 ± 2.92Da
	4	215.24 ± 4.18Ab	140.02 ± 3.33Bc	298.21 ± 8.77Aa	224.57 ± 9.29Bb
	8	151.08 ± 5.10Bc	158.69 ± 7.02Ac	262.14 ± 10.62Ba	243.88 ± 2.46Ab
	12	152.01 ± 4.46Bb	121.44 ± 4.47Cc	242.35 ± 10.07Ba	154.12 ± 10.52Cb
NH ₄ ⁺ -N	0	51.51 ± 2.89Dc	63.65 ± 2.33Cd	58.45 ± 2.58Dbc	87.03 ± 4.7Ca
	4	161.59 ± 3.03Bd	193.54 ± 0.84Bb	180.34 ± 1.68Ac	221.91 ± 1.55Aa
	8	126.49 ± 0.74Cd	218.36 ± 1.05Aa	175.06 ± 1.55Bc	204.11 ± 4.56Bb
	12	191.52 ± 3.39Ab	194.11 ± 2.85Bb	137.14 ± 0.88Cc	227.84 ± 3.58Aa
MBC	0	879.17 ± 23.20Ad	1 130.01 ± 27.97Ab	1 470.19 ± 67.29Aa	1 444.42 ± 41.38Aa
	4	611.5 ± 0.39Bc	992.44 ± 53.20Ba	859.63 ± 45.94Cb	774.66 ± 50.39Cb
	8	575.42 ± 24.26Bd	1 076.04 ± 29.83ABa	949.82 ± 44.48Cb	800.33 ± 30.08Cc
	12	879.87 ± 25.67Ad	1 057.1 ± 22.81ABc	1 253.15 ± 16.23Bb	1 357.74 ± 8.71Ba
MBN	0	25.68 ± 2.63Bd	45.16 ± 5.26Ac	51.39 ± 5.53ABc	80.06 ± 6.53Aa
	4	29.72 ± 7.8Bb	39.32 ± 2.93ABb	67.21 ± 7.70Aa	54.8 ± 6.85Bab
	8	39.6 ± 4.81ABb	26.42 ± 2.30Bb	58.09 ± 5.71Aa	48.08 ± 9.66Bab
	12	48.53 ± 6.30Ab	45.18 ± 9.44Ab	38.63 ± 6.91Bb	80.33 ± 5.35Aa

1) DOC 表示可溶性有机碳;NH₄⁺-N表示铵态氮;MBC 表示土壤微生物生物量碳;MBN 表示微生物生物量氮;不同大写字母表示同一施肥处理不同培养时间之间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一培养时间不同施肥处理之间差异显著(P<0.05)

58%和25%,ST处理NAG的K_m没有显著变化。个月时降为初始的1/2;OM处理先增后减,培养4个月到达峰值5.84 h⁻¹,NPK处理BG的K_a一直升

ST处理BG的K_a值随培养时间逐渐降低,12

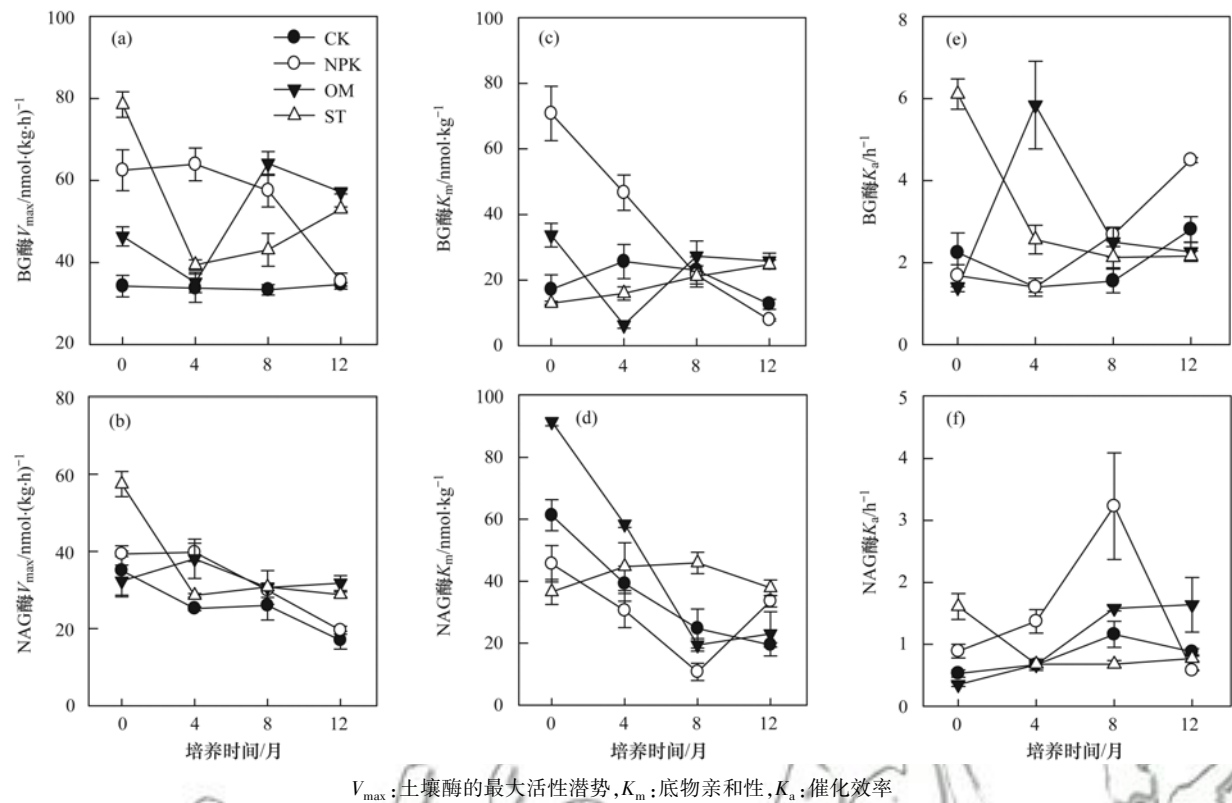


图 2 β -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 的酶动力参数

Fig. 2 Kinetic parameters ($V_{\max}$, K_m , and K_a) of β -1,4-glucosidase (BG) and β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG)

高, 12 个月时增加到初始的 2 倍, 显著高于其他处理[图 2(e)]. 淹水培养期间 CK、OM、ST 处理 NAG 的 K_a 整体波动不大, NPK 处理的 K_a 先增后减, 12 个月时降到 0 个月的水平, 但整体上高于其他处理[图 2(f)].

2.3 碳氮可利用性对土壤最大潜在酶活性的调控机制

土壤可利用态碳氮是影响土壤微生物生物量和酶活性变化的主要因素. 相关性分析表明, CK 和 OM 处理中与 MBC/MBN 间显著正相关关系[$P < 0.05$, 图 3(a)]. 而对于酶活性, 随着 $\text{DOC}/\text{NH}_4^+\text{-N}$

比值的增加, 显著降低了 CK 和 ST 处理中的 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 比值[$P < 0.05$, 图 3(b)]. MBC/MBN 比值只对 CK 处理中的 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 比值有显著的正向影响[$P < 0.05$, 图 3(c)], 而在其他处理的土壤中没有显著性关系.

方差分析结果显示(表 3), 施肥处理和培养时间以及二者的交互作用都能显著影响土壤中 DOC 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBC 和 MBN 的含量变化($P < 0.01$); 也显著影响了土壤中参与碳循环的酶活性, 尤其是对 BG 和 NAG 的最大酶活性潜势有极显著的影响($P < 0.05$).

表 3 施肥处理和培养时间对碳氮变化与土壤酶活性的影响¹⁾

Table 3 Two-way ANOVA ($P = 0.05$) of soil properties and kinetic parameters ($V_{\max}$, K_m , and K_a) of soil from different long-term fertilizer treatments

项目	DOC	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	MBC	MBN	BG			NAG		
					$V_{\max}$	K_m	K_a	$V_{\max}$	K_m	K_a
施肥处理	F 498.81 ***	1 028.98 ***	305.82 ***	57.48 ***	31.67 ***	3.4 *	20.34 ***	18.91 ***	8.89 ***	6.45 **
培养时间	F 659.83 ***	6 086.17 ***	399.41 ***	5.61 **	12.48 ***	3.21 *	1.30	47.45 ***	48.06 ***	12.05 ***
施肥处理 $\times$ 培养时间	F 74.21 ***	201.90 ***	47.66 ***	13.35 ***	14.11 ***	3.85 **	2.43 *	12.38 ***	12.15 ***	9.90 ***

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$; F 表示 F 检验的统计量值; $V_{\max}$ 表示土壤酶的最大活性潜势; K_m 表示底物亲和性; K_a 表示催化效率

通过对培养时间、施肥处理、可利用性底物和酶活性等变量进行了相关分析和结构方程模型分析, 结果表明在自由度为 13 条件下($P < 0.05$), χ^2 值为 15.1 (< 22.36 , 临界值), 即该模型能够代表

自变量和因变量的关系(图 4). 同时用通径系数来估计自变量对因变量直接影响效应的大小, 比较其相对重要性, 即土壤 DOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量主要通过影响 MBC 含量进而影响土壤最大潜在酶活

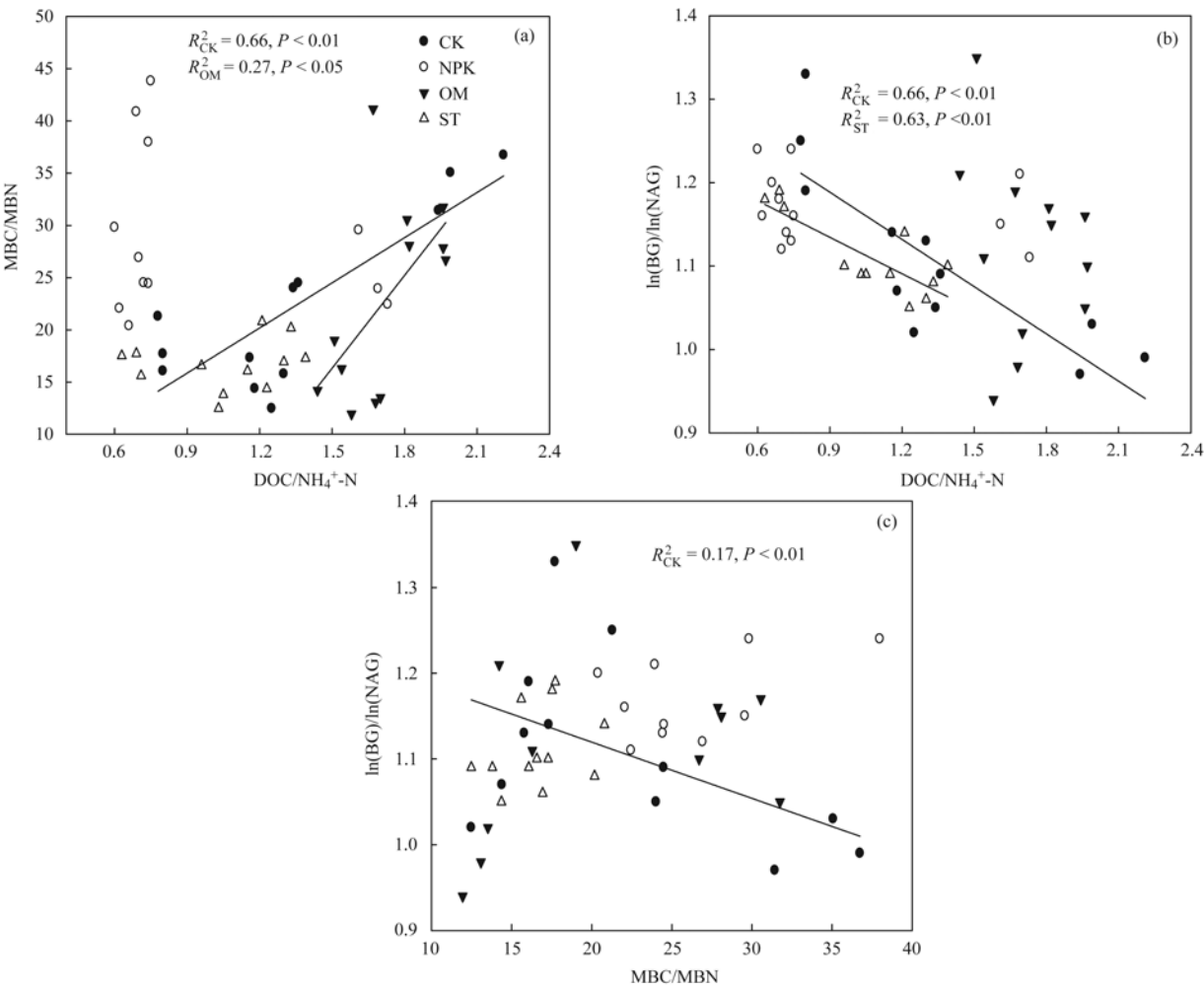


图 3 $\text{DOC}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 MBC/MBN 和 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 三者间的线性回归关系
Fig. 3 Relationships between $\text{DOC}/\text{NH}_4^+-\text{N}$, MBC/MBN , and $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$

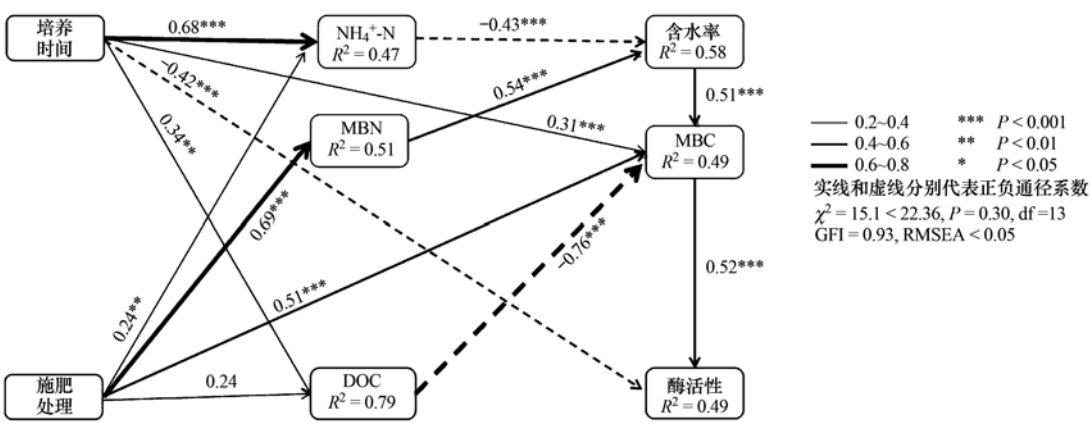


图 4 土壤酶活性的影响因素的结构方程模型分析

Fig. 4 Structural equation modeling assessing multivariate effects on the enzyme activities

性的,二者对酶活变化的影响效应值达到 -0.40 和 -0.11 . DOC 和 NH_4^+-N 含量受到施肥处理和培养时间的显著影响,且施肥处理和培养时间也能通过影响 MBC 含量进而影响土壤最大潜在酶活性,培养时间对土壤最大酶活性潜势有直接显著负影响 (-0.42). 该模型解释了土壤最大酶活性潜势 49% 的变异.

3 讨论

土壤有机质转化过程是在胞外酶的参与下进行的,土壤酶主要来自微生物,胞外酶活性可以反映微生物是否受到营养限制^[20, 21],是反映土壤养分肥力水平的灵敏指标^[22]. 土壤胞外酶的合成和分泌与土壤的养分状态尤其是可利用态碳氮等养分元素密切

相关^[23],农田土壤长期肥料管理导致土壤中碳氮等元素含量差异明显,进而影响土壤中胞外酶的分泌与活性.有机肥,包括秸秆和动物粪便等,含有大量有机态碳、氮、磷元素以及微量元素,可为土壤提供大量的可利用态碳氮物质^[24],本研究也发现,长期有机肥以及有机无机配施的土壤中可利用态碳氮显著高于其他处理的土壤(图1).张瑞等^[25]也发现有机肥无机肥配施显著增加土壤水溶性有机碳和易氧化有机碳含量,有机肥对土壤水溶性有机碳含量增加作用显著高于单施化肥.而大量可利用态底物的输入也促进了微生物的生长,因而显著增加了 MBC 和 MBN 的含量(图1).

一般认为,当环境中的可利用性底物无法满足微生物维持细胞功能和生存能力时,微生物就会合成相应的酶并分泌到体外,从而降解有机质获得所缺元素^[26].本研究发现,不同培养时间下的土壤酶活性变化显著,整体上呈现下降趋势(图2).这主要是因为随着培养时间延长,微生物消耗了土壤中可利用态有机碳,使得微生物逐渐受到碳源和能量的限制.而对比不同施肥处理的土壤发现,NPK 和 ST 处理在培养试验起始点是 BG 酶活性最大,这可能因为在 NPK 处理中微生物处于碳限制,因此需要分泌 BG 酶分解土壤有机质中的碳,满足自身对碳的需求;而在 ST 处理中,微生物需要分解秸秆及其次级代谢产物,所以刺激了 BG 酶活性.12 个月的培养期使 OM 中可利用态碳消耗较快,为了继续分解有机肥中的碳源,因而 BG 酶活性在后期得到了显著增加. NAG 酶活性随培养时间而逐渐降低,可能主要是因为土壤中可利用碳源的消耗,逐渐减少的碳源与能量,使微生物对氮源的需求降低,也降低了氮水解酶的分泌与活性.酶活性很大程度上依赖于微生物的活性和生物量,取决于资源的供应和需求^[27,3].本研究中结构方程模型分析也表明土壤 DOC 和 NH_4^+ -N 含量主要通过影响 MBC 含量进而影响土壤酶活性.前人研究表明向土壤中添加葡萄糖会引起微生物生物量的增加^[28,29],土壤中活性有机氮含量与 L-天冬酰胺酶/ β -D-葡萄糖苷酶活性呈反比关系^[30,31],这与本试验的研究结果一致.土壤微生物总是优先将能量用于产生胞外酶,然后才用于自身生物量的增加^[32].

土壤胞外酶活性受可利用态碳氮计量比调控,微生物为维持自身元素比的稳定性,会根据土壤可利用态底物化学计量比分配代谢过程中的养分和能量,从而改变土壤酶的计量关系^[33-35].在土壤有机质分解过程中,养分有效性本身会影响微生物的底物碳源利用效率,也会影响微生物对养分水平的反

馈调控. N 添加往往会提高微生物对 C 的利用效率,从而增加生物量中 C 的相对富集^[36].在有足够的 C 供应的情况下,不断增加的有效性 N 满足微生物 C/N 化学计量的需求,促进微生物的生长.而随着 DOC/NH_4^+ -N 的增加, N 供应相对不足,因此促进 N 获取酶(NAG)活性增加和微生物对氮素的相对富集(MBN 增加),表现为 DOC/NH_4^+ -N 与 MBC/MBN 呈正相关, DOC/NH_4^+ -N 与 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 之间显著负相关(图3).土壤中 DOC/NH_4^+ -N、 MBC/MBN 和 $\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG})$ 比值三者间相关规律仅在部分施肥处理中表现显著,这主要是因为不同长期施肥土壤中的碳氮相对含量以及质量组分不同,不施肥以及化肥和有机粪配施的土壤中主要受氮限制,而单施化肥和秸秆还田配施化肥的土壤中主要受碳限制^[37].这也是为什么在长期单施化肥和秸秆还田水稻土在培养 0 个月时 BG 和 NAG 的最大活性潜势高于其他施肥处理.但二者又有所不同,秸秆含有大量纤维素,微生物通过分泌酶将其降解为小分子物质才能用于自身代谢活动,纤维素分解提高了土壤中可利用性碳的含量,微生物对氮的需求量也增大,相应酶的分泌增多.而长期单施化肥不利于土壤有机质的积累,造成了土壤的自我调节功能下降、肥力下降和养分不均衡等问题^[38],为获得可利用性碳氮, BG 和 NAG 增强.总的来说,微生物为了维持自身元素内稳性^[39],用于获取不同养分资源的酶产生与活性有所差异^[40,41],也表现出不同计量关系,从而实现调控土壤中碳与养分元素的循环过程.

4 结论

(1)不同的长期施肥水稻土,随淹水培养时间的延长,其可利用态碳氮比逐渐降低;长期施用有机肥(包括秸秆)的土壤具有更强的碳氮损失缓冲能力,维持相对较高的可利用态碳含量和微生物生物量.

(2)土壤中碳氮转化相关酶活性(BG 和 NAG)随土壤可利用态有机碳的消耗而降低;在一年的淹水培养后,由于需要分解土壤中残留的已输入有机碳而表现出最大的 BG 酶活性,同时可能因为需要满足微生物对氮素的计量学需求, NAG 酶活性也相应大于其它施肥处理.

(3)通过研究不同淹水培养时间的长期施肥土壤的酶活性,发现土壤酶活性主要是受土壤可利用态有机碳和土壤微生物生物量碳的影响,说明尽管土壤可利用态碳氮比和微生物量碳氮比会存在差异,但是微生物对碳源的利用是调控胞外酶活性的主要驱动力.

致谢: 对中国科学院亚热带农业生态研究所公共技术服务中心对本研究提供的技术支持和课题组同学在采样时的热心帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] Asmar F, Eiland F, Nielsen N E. Effect of extracellular-enzyme activities on solubilization rate of soil organic nitrogen [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, **17**(1): 32-38.
- [2] Burns R G, Wallenstein W D. Microbial extracellular enzymes and natural and synthetic polymer degradation in soil: current research and future prospects [A]. In: *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World* [C]. Brisbane, Australia: DVD, 2010. 67-73.
- [3] 徐建峰, 赵家豪, 袁在翔, 等. 不同树种与土地利用方式对土壤微生物生物量碳氮的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, **38**(4): 95-100, 113.
Xu J H, Zhao J H, Yuan Z K, *et al.* Effects of tree species and landuse patterns on soil microbial biomass carbon & nitrogen [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, **38**(4): 95-100, 113.
- [4] 黄亮亮, 阮宏华, 王莹, 等. 围湖造田不同利用类型下土壤微生物量碳的特征 [J]. *林业科技开发*, 2010, **24**(4): 64-67.
Huang L L, Ruan H H, Wang Y, *et al.* Soil microbial biomass carbon in different land uses after reclaiming around the Taihu lake [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2010, **24**(4): 64-67.
- [5] Wei L, Razavi B S, Wang W Q, *et al.* Labile carbon matters more than temperature for enzyme activity in paddy soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **135**: 134-143.
- [6] Leff J W, Jones S E, Prober S M, *et al.* Consistent responses of soil microbial communities to elevated nutrient inputs in grasslands across the globe [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(35): 10967-10972.
- [7] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(3): 235-252.
- [8] 汤珍珠. 元素计量比对稻田土壤碳周转的影响与调控特征 [D]. 武汉: 湖北大学, 2017.
Tang Z Z. Effects of element metering ratio on carbon turnover in paddy soil and its regulation [D]. Wuhan: Hubei University, 2017.
- [9] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(6): 837-843.
- [10] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(4): 747-758.
- [11] 廖畅, 田秋香, 汪东亚, 等. 外源碳输入对中亚热带森林深层土壤碳矿化和微生物决策群落的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(9): 2848-2854.
Liao C, Tian Q X, Wang Y D, *et al.* Effects of labile carbon addition on organic carbon mineralization and microbial growth strategies in subtropical forest soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): 2848-2854.
- [12] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 296-303.
Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J, *et al.* Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(2): 296-303.
- [13] 高祥照, 马文奇, 崔勇, 等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(4): 363-369.
Gao X Z, Ma W Q, Cui Y, *et al.* Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000, **6**(4): 363-369.
- [14] 封海胜, 张思苏, 万书波, 等. 连作花生土壤养分变化及对施肥反应 [J]. *中国油料*, 1993, (2): 53-57.
Fenag H S, Zhang S S, Wan S B, *et al.* The variation of nutrient in soil of sequential cropping of peanut and its response to fertilizer [J]. *Zhongguo Youliao*, 1993, (2): 53-57.
- [15] Atere C T, Ge T D, Zhu Z K, *et al.* Assimilate allocation by rice and carbon stabilisation in soil: effect of water management and phosphorus fertilisation [J]. *Plant and Soil*, 2019, **445**: 153 - 167.
- [16] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z H, *et al.* Biogeochemistry of paddy soils [J]. *Geoderma*, 2010, **157**(1-2): 1-14.
- [17] 鲍士旦, 秦怀英, 劳家桢, 等. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [18] 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.
- [19] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1309-1315.
- [20] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. *Nature*, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [21] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Eoenzymatic stoichiometry and ecological theory [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**: 313-343.
- [22] Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review [J]. *Pedobiologia*, 2005, **49**(6): 637-644.
- [23] Hobbie J E, Hobbie E A. Microbes in nature are limited by carbon and energy: the starving-survival lifestyle in soil and consequences for estimating microbial rates [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **4**: 324.
- [24] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [25] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 277-282.
Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 277-282.
- [26] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, *et al.* Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 216-234.
- [27] Nannipieri P, Giagnoni L, Renella G, *et al.* Soil enzymology: classical and molecular approaches [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(7): 743-762.
- [28] Blagodatskaya E V, Blagodatsky S A, Anderson T H, *et al.* Contrasting effects of glucose, living roots and maize straw on microbial growth kinetics and substrate availability in soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, **60**(2): 186-197.
- [29] Wutzler T, Blagodatsky S A, Blagodatskaya E, *et al.* Soil microbial biomass and its activity estimated by kinetic respiration

- analysis-Statistical guidelines[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **45**: 102-112.
- [30] Fujita K, Miyabara Y, Kunito T. Microbial biomass and ecoenzymatic stoichiometries vary in response to nutrient availability in an arable soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2019, **91**: 1-8.
- [31] Fujita K, Kunito T, Matsushita J, *et al.* Nitrogen supply rate regulates microbial resource allocation for synthesis of nitrogen-acquiring enzymes[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(8): e0202086.
- [32] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(4): 549-563.
- [33] Soong J L, Maraňon-Jimenez S, Cotrufo M F, *et al.* Soil microbial CNP and respiration responses to organic matter and nutrient additions: evidence from a tropical soil incubation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **122**: 141-149.
- [34] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, *et al.* The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. *Ecological Monographs*, 2015, **85**(2): 133-155.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 郝秀娟, 邱春莲. 综述化肥零增长[J]. *中国农业信息*, 2017, (7): 74-76.
- [38] Moorhead D L, Lashermes G, Sinsabaugh R L. A theoretical model of C-and N-acquiring exoenzyme activities, which balances microbial demands during decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **53**: 133-141.
- [39] Sinsabaugh R L, Belnap J, Findlay S G, *et al.* Extracellular enzyme kinetics scale with resource availability [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **121**(2): 287-304.
- [40] 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.
- [41] Allison S D, Weintraub M N, Gartner T B, *et al.* Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function[A]. In: Shukla G, Varma A, (Eds.). *Soil Enzymology*[M]. Berlin: Springer, 2010. 229-243.



CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)