

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应

魏亮^{1,2}, 汤珍珠^{1,3}, 祝贞科^{1*}, 蔡观^{1,4}, 葛体达¹, 王久荣¹, 吴金水¹

(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; 3. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 4. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 与稻田土壤碳氮循环(矿化、转化等)密切相关的酶活性可以反映微生物的生长和代谢过程。为明确水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应, 采用根际袋法区分水稻根际和非根际土壤, 利用 96 微孔酶标板荧光分析法, 测定其碳氮过程关键酶 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, 探讨根际效应、施氮和生育期对土壤酶活的影响及其调控机制。结果表明, 施氮使拔节期土壤 BG 酶活性相对于不施氮处理降低了 $7.4 \sim 13.5 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 而使成熟期 BG 酶活性增大了 $7.0 \sim 31.4 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 同时根际与非根际土壤中 BG 酶活性也随水稻的生育期而发生相应的变化。与不施氮处理相比, 施氮使水稻成熟期非根际土壤 NAG 酶活性增加了 1.1 倍, 根际土壤降低了 0.3 倍。施氮和生育期显著影响土壤 BG 酶活性, 而水稻生育期、施氮和根际效应及其交互作用均对 NAG 酶活性有极显著影响。RDA 分析表明土壤微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)含量主要影响水稻根际土壤胞外酶活性; 而非根际土壤中酶活性的变化主要受微生物生物量氮(MBN)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的影响。土壤酶活性与多种因素存在复杂关系, 需要综合考虑植物生理特征、土壤酶活性和土壤特征, 分析 N 添加对微生物群落组成的影响。

关键词: 水稻土; 水稻生育期; 根际土壤; 施氮; 胞外酶活性

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3489-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701125

Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil

WEI Liang^{1,2}, TANG Zhen-zhu^{1,3}, ZHU Zhen-ke^{1*}, CAI Guan^{1,4}, GE Ti-da¹, WANG Jiu-rong¹, WU Jin-shui¹

(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; 3. College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China; 4. College of Resources and Environment, Hunan agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Ecological enzyme activities are closely relevant to the carbon and nitrogen decomposition and mineralization of paddy soils, which can reflect the growth and metabolism of microorganisms. In order to clarify the response to nitrogen application by different enzymes in the rhizosphere and bulk soil of rice, the rhizosphere and bulk soil were identified using a rhizosphere bag. In addition, the β -1,4-glucosidase (BG) enzyme; β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG) enzyme; and the effects of the rhizosphere, nitrogen application, and growth period on soil enzyme activities were analyzed. The results showed that the activity of the BG enzyme decreased by $7.4 \sim 13.5 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ in the jointing stage and increased by $7.0 \sim 31.4 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ in the maturity stage, and the activity of the BG enzyme in the rhizosphere and bulk soil also changed with the growth period of rice. compared with no nitrogen fertilizer, nitrogen application increased NAG enzyme activity by 1.1 times and rhizosphere soil by 0.3 times in the bulk soil in the maturity stage. Nitrogen application and growth period had significant effects on soil BG enzyme activity, whereas the interaction within rice growth stage, nitrogen application, and rhizosphere effect had significant effects on NAG enzyme activity. The result of RDA showed that the soil microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) contents mainly affected the activity of extracellular enzymes in the rice rhizosphere soil, whereas the activities of enzymes in the rhizosphere soil were mainly affected by microbial biomass nitrogen (MBN) and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. The relationships between soil enzyme activity and various factors are complex, and the effects of nitrogen addition on microbial community composition needs to be considered after accounting for plant physiological characteristics, soil enzyme activity, and soil characteristics.

Key words: paddy soil; rice growth period; rhizosphere soil; nitrogen application; extracellular enzyme activity

收稿日期: 2017-01-15; 修订日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501321); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ3132); 政府间国际科技创新合作重点专项项目(S2016G0053)

作者简介: 魏亮(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: weiliang16@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhuzhenke@isa.ac.cn

土壤胞外酶在生态系统中扮演着重要角色,其活性高低反映土壤微生物新陈代谢状况^[1],及土壤进行特定生化反应的潜力,对于保持土壤肥力和植物生产力极其重要^[2]. 大多数胞外酶通过微生物响应环境条件的变化而被表达、释放到土壤中,另一些则是通过微生物细胞破裂或根细胞脱落后释放进入土壤^[3]. 土壤-微生物-作物根系互作系统组成根际微环境,土壤胞外酶是其关键的中间介质^[4,5]. 根际土壤微环境养分通过根际或与菌根真菌结合转移到根表面,显著影响作物养分获取和健康^[6]. 研究表明,水稻不同生育期的根系分泌物存在差异^[7],高浓度的根系分泌物和快速生长的植物会刺激根际微生物的活性^[8],导致根际土壤酶活性显著高于非根际土壤^[9]. 另有报道水稻生长处于高峰期时,水稻根系与根际土壤微生物进行营养竞争,导致根际土壤微生物活性下降^[10]; Muarry 等^[11]认为根系分泌物中酚酸物质能够减少微生物对其生长介质的利用,进而降低土壤酶活性. 随着分子生物学技术在土壤研究领域的应用,土壤酶和土壤微生物的研究成果较多,但稻田氮肥施用对非根际土壤胞外酶活性的研究相对根际土壤较少,且水稻根际微环境对土壤胞外酶活性的影响尚无统一认识^[12].

碳是植物生长的能量元素,氮则是植物生长的首要营养元素^[13]. 土壤中氮的输入水平与可利用性对土壤碳循环起着关键的调控过程,土壤碳周转取决于氮对微生物的影响^[14,15]. 土壤氮素输入改变着作物和植被的生物量,扰动分泌酶的微生物,进而影响酶的活性^[16]. 土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG) 和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -1,4-N-acetyl-glucosaminidase, NAG) 在有机质分解中起重要作用^[17,18],大量研究表明施氮对酶活性的影响在不同区域存在明显差异,施氮能够显著增加土壤 BG 酶活性^[19~21]、对 BG 酶活性无影响^[22]或降低 BG 酶活性^[23]. 同时,施氮对 NAG 酶活性亦有促进或抑制作用^[19,21,24]. 以往研究发现,酶活性受到多种因素影响,如土壤物理性质、土壤养分、土壤微生物、人为因素以及植物根系等^[1]. 氮肥作为活性氮输入到土壤对胞外酶活性的影响在空间上有限,但其在短期内剧烈扰动土壤微生物生物量,长期施肥可以改变微生物的群落组成^[23]. 因此,为提高作物产量及氮肥利用效率,系统开展氮素对稻田土壤根际与非根际胞外酶活性的研究显得尤为重要和迫切.

本文选取多年种植水稻的典型红壤,采用盆栽

实验,利用根际袋法区分水稻根际和非根际土壤,将水稻不同生育期根际与非根际土壤中 BG 酶和 NAG 酶作为研究对象,从施氮、根际效应和水稻生育期等影响因素出发,探讨其如何影响土壤微生物驱动的胞外酶活性变化过程,试图寻找水稻生育期内根际和非根际土壤酶活性对氮肥施用的响应程度,以期稻田土壤氮肥利用提供必要的理论依据.

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,供试水稻为粘性常规水稻中早 39. 土壤样品采自中国科学院长沙农业环境观测研究站(113°19'52"E, 28°33'04"N, 亚热带典型湿润气候,年平均温度 17.5℃,降雨量 1 300 mm,日照 1 663 h). 2013 年 4 月,采集耕作层(0~20 cm)土壤,湿润条件(含水率,14.8%)下过 4 mm 尼龙筛除去植物残体,一部分于 4℃ 保存备用,少部分风干用于测定基本理化性质,所有指标测定方法均参照文献[25]. 用 Mettler-toledo320 pH 计按水土比 1:2.5 测定土壤 pH; 阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定;土壤有机碳和全氮采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N, 德国)测定(干烧法);土壤全磷采用氧化钠熔融法-紫外分光光度计(UV-2450, 日本)测定;土壤机械组成采用比重计法测定. 供试土壤基本理化性质如下: pH 为 5.56, 阳离子交换量(CEC)为 7.76 cmol·kg⁻¹, 土壤有机碳(SOC)13.48 g·kg⁻¹, 全氮(TN)0.83 g·kg⁻¹, 全磷(TP)为 1.62 g·kg⁻¹, 碳氮比(C/N)为 16:24.1, 黏粒、粉粒和砂粒分别占 68.36%、24.13% 和 7.51%.

1.2 实验设计

土壤样品除去可见植物残体,喷施 NaH₂PO₄ (按 P 含量计算 30 mg·kg⁻¹) 和 KCl (按 K 含量计算 160 mg·kg⁻¹) 混合溶液作为基肥,混匀后分装于盆钵(直径 17.2 cm, 高 16.7 cm)中,每盆装入量相当于烘干重 1.60 kg 土壤,根际袋(直径 3.5 cm, 高 15 cm; 孔径为 30 μm)中装入相当于烘干重 0.32 kg 土壤. 水稻种植实验设置 2 个处理:施氮肥(NH₄)₂SO₄ (按 N 含量计算 100 mg·kg⁻¹) 和不施氮处理,施氮处理中,土壤装入盆之前,氮肥一次性加入土壤并混合均匀,为减少氮的损失,每盆施入 25 mg·kg⁻¹ 硝化抑制剂 DCD, 每个处理设 3 个重复.

1.3 测定方法

在水稻移栽后的 40 d 和 80 d (对应水稻拔节期

和成熟期),分别采集水稻根际和非根际土壤测定土壤含水量、碳氮含量、微生物量和土壤酶活性等指标. 土壤微生物生物量碳氮(MBC、MBN, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量采用氯仿熏蒸提取-碳自动分析法测定^[26,27],同时,测未熏蒸土壤对照,得到土壤溶解性有机碳(DOC, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量. 以熏蒸与未熏蒸土样提取的有机碳差值乘以转换系数 K_c (0.45)得到土壤 MBC 含量. 土壤 NH_4^+-N 采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提,流动注射仪(Fiastar 5000,瑞典福斯)测定. 土壤胞外酶活性测定采用 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).

1.4 数据处理和统计分析

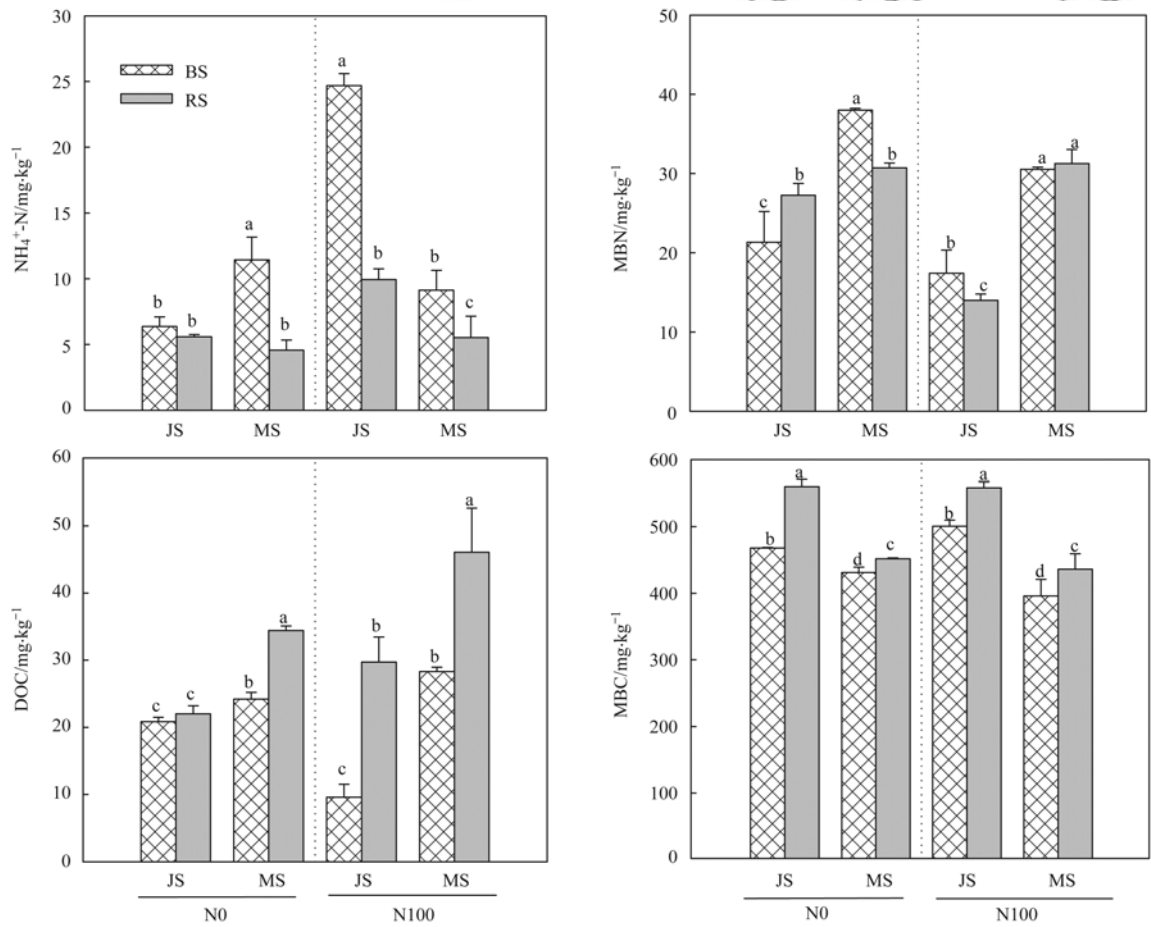
采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 18.0 进行数据处理和统计分析($P < 0.05$),不同处理显著性用 One-way ANOVA(单因素方差分析)进行检验,采用

Duncan 多重比较分析组间差异,RDA(冗余分析)和方差分解通过 Canoco 5 实现,Sigma plot 12.5 作图,图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准误.

2 结果与分析

2.1 水稻不同生育期根际与非根际土壤 DOC、MBC、MBN、 NH_4^+-N 含量

水稻土中可利用态 N 主要以 NH_4^+-N 形式存在. 外源 N 肥的添加,显著增加了水稻生长前期(拔节期)土壤中 NH_4^+-N 的含量,随着水稻的生长 NH_4^+-N 逐渐被消耗,且根际土中 NH_4^+-N 的含量显著低于非根际土;非根际土中 NH_4^+-N 的含量逐渐由 $24.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $9.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根际土中 NH_4^+-N 的含量逐渐由 $9.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $5.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1). 施氮在增加土壤中可利用态 N 含量的同时,降低了土壤 MBN 的量;施氮处理,水稻拔节期根际和非根际土壤 MBN 含量分别为 $14.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $17.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在成熟期随着土壤 NH_4^+-N 的含量的降低,



JS:拔节期(jointing stage); MS:成熟期(maturity stage); BS:非根际土壤(bulk soil); RS:根际土壤(rhizosphere soil),下同

图 1 水稻不同生育期根际与非根际土壤 DOC、MBC、MBN 和 NH_4^+-N 含量

Fig. 1 Contents of soil DOC, MBC, MBN, and NH_4^+-N in rice of various ages with rhizosphere and bulk soil

土壤 MBN 含量增加至约 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

水稻生长过程中,土壤 DOC 含量显著增加,根际土壤中 DOC 含量显著高于非根际土壤,施氮处理中根际土壤 DOC 含量是非根际土壤 DOC 的 1.6 ~ 3.1 倍. 水稻拔节期到成熟期,土壤 MBC 显著降低,且根际土壤中 MBC 显著高于非根际土 MBC.

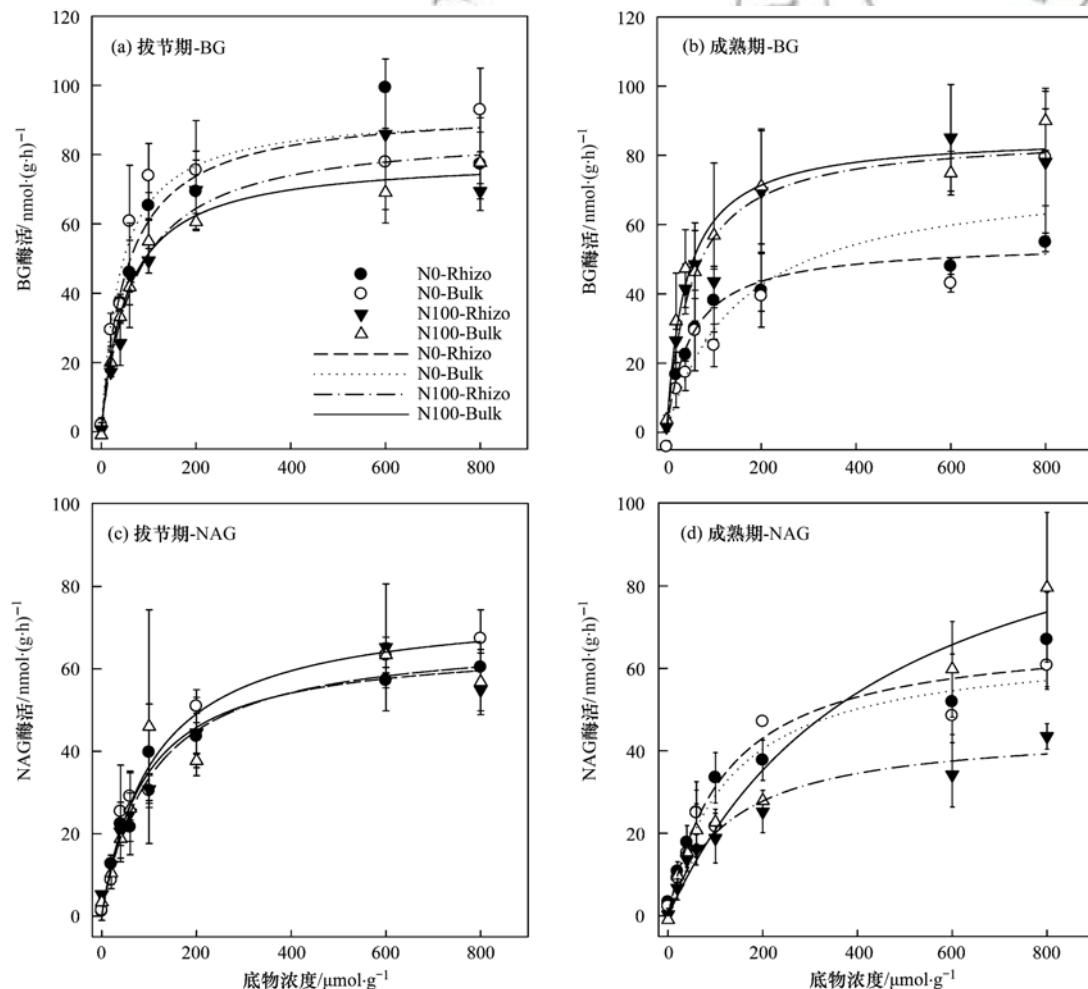
2.2 水稻不同生育期根际与非根际土壤酶活性对施氮的响应

氮肥添加以及水稻生长期都能影响根际和非根际土壤中碳氮转化相关酶活性的变化,根据米氏方程拟合得到的土壤酶的最大活性潜势($V_{\max}$)及其土壤酶亲和力(K_m) (图 2 和表 1). 氮肥添加使拔节期土壤 BG 酶活性相对于不施氮处理降低了 7.4 ~ $13.5 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,而使成熟期 BG 酶活性增大了 $7.0 \sim 31.4 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,同时根际与非根际土壤中 BG 酶活性,也随水稻的生育期而发生相应的变化. 相对于不施氮处理,施氮使水稻成熟期非根际

土壤 NAG 酶活性增加了 1.1 倍,根际土壤降低了 0.3 倍. 水稻不同生育期的催化效率(K_a)对施氮有不同程度响应,施氮土壤成熟期 BG 酶催化效率显著高于拔节期,成熟期施氮处理非根际土壤的 BG 酶催化效率显著高于根际土壤($P < 0.05$). 施氮处理水稻成熟期非根际土壤 NAG 酶催化效率显著高于根际土壤($P < 0.05$).

2.3 水稻生育期和根际效应对土壤胞外酶活性的影响

对影响土壤酶活的三因素(施氮、根际效应、生育期)进行多重比较(表 2)发现,施氮和生育期的交互作用对 BG 酶活性影响显著,水稻生育期极显著地影响了土壤 BG 酶活性;施氮、根际和生育期及其交互作用均对 NAG 酶活性有极显著影响. 为进一步分析施氮、根际效应、生育期对水稻土壤酶活性的影响效果,进行了方差分解(图 3),得到根际因素对酶活性的解释率为 19.3%,水稻生育期对酶



图例说明见表 1

图 2 水稻根际与非根际土壤胞外酶活性动力学

Fig. 2 Enzyme kinetics of the BG and NAG enzymes in the rhizosphere and bulk soil

表 1 水稻不同生育期土壤酶活性动力学参数

Table 1 Kinetic parameters ($V_{\max}$, K_m , and K_a) of the soil extracellular enzymes in the rhizosphere and bulk soil							
生育期	处理	BG			NAG		
		$V_{\max}$	K_m	K_a	$V_{\max}$	K_m	K_a
拔节期	N0-Rhizo	94.82 ± 6.76a	57.76 ± 19.30	1.77 ± 0.59ab	66.97 ± 1.79b	95.13 ± 26.12	0.74 ± 0.22
	N0-Bulk	92.83 ± 9.33ab	42.2 ± 17.18	2.37 ± 0.64a	76.08 ± 6.16a	112.76 ± 37.05	0.72 ± 0.20
	N100-Rhizo	87.45 ± 7.40ab	71.89 ± 15.48	1.25 ± 0.23c	68.75 ± 4.29ab	110.09 ± 36.40	0.68 ± 0.25
	N100-Bulk	79.35 ± 6.04b	54.19 ± 9.71	1.48 ± 0.16ab	66.94 ± 3.20b	92.13 ± 23.77	0.77 ± 0.27
成熟期	N0-Rhizo	54.70 ± 5.63b	50.67 ± 3.24	1.08 ± 0.04b	69.55 ± 12.39b	122.91 ± 25.98b	0.57 ± 0.08ab
	N0-Bulk	80.33 ± 22.53ab	51.26 ± 1.19	1.57 ± 0.46ab	67.28 ± 14.82bc	134.07 ± 56.27ab	0.55 ± 0.17ab
	N100-Rhizo	86.05 ± 13.42ab	52.24 ± 10.07	1.66 ± 0.08ab	45.73 ± 1.63c	133.59 ± 43.57ab	0.35 ± 0.13b
	N100-Bulk	87.35 ± 7.26a	53.43 ± 15.52	2.02 ± 0.55a	140.51 ± 13.85a	200.56 ± 2.48a	0.70 ± 0.07a

1) 拟合曲线 $R^2 > 0.9$; 2) N0 为不施氮, N100 为施氮 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Rhizo 为根际土壤, Bulk 为非根际土壤; 3) 生育期内不同处理的 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$), 无显著差异的未标出

表 2 施氮、根际效应和不同生育期对土壤胞外酶活的多重比较

Table 2 Effects of nitrogen application, rhizosphere effect, and different growth stages on the activities of two kinds of extracellular enzymes in soil						
因素	BG			NAG		
	自由度	F 值	P 值	自由度	F 值	P 值
施氮	1	0.93	0.350 2	1	8.31	0.010 8 *
根际效应	1	0.85	0.369 6	1	46.89	0.000 0 **
生育期	1	6.38	0.022 5 *	1	9.25	0.007 8 **
施氮 × 根际	1	2.79	0.114 5	1	34.92	0.000 0 **
施氮 × 生育期	1	10.57	0.005 0 **	1	15.17	0.001 3 **
根际 × 生育期	1	4.12	0.059 2	1	34.18	0.000 0 **
施氮 × 根际 × 生育期	1	1.00	0.332 5	1	54.88	0.000 0 **

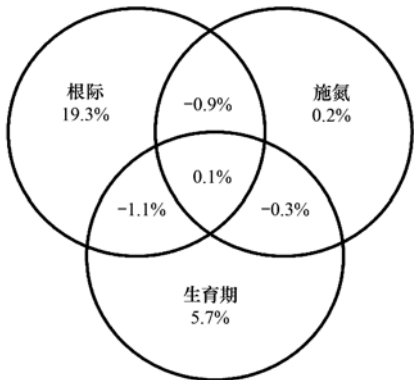


图 3 三组解释变量(水稻生育期、施肥处理、根际效应)对水稻土壤酶活性变化贡献的韦恩图分析

Fig. 3 Venn diagrams describing the partitioning of the variation of relative soil enzyme activities among three sets of explanatory variables

活性的变异解释率为 5.7%.

2.4 土壤生物化学因子变化对土壤酶活性的影响

水稻-土壤系统中土壤酶活性的变化是多因素共同影响的结果. 对拔节期和成熟期根际土壤基本指标和酶活性进行 Pearson 相关分析发现(表 3), NH_4^+ -N 与土壤溶解性有机碳(DOC)表现出极显著的负相关性($R = -0.664, P < 0.01$), 土壤微生物生物量碳(MBC)与土壤微生物量氮(MBN)表现出极显著的负相关性($R = -0.648, P < 0.01$); 同时非根际土壤 MBC 与 NAG 酶活性呈显著正相关, 而和 BG 酶活性无显著相关关系. 对影响水稻根际和非根际土壤胞外酶活性的主要因子进行 RDA 分析(图 4), 发现土壤 MBC 和 DOC 含量主要影响水稻

表 3 水稻生育期根际土壤酶活和土壤基本指标的 Pearson 相关分析¹⁾

Table 3 Pearson correlation analysis of rhizosphere soil enzyme activity and basic index across rice growth stage								
	BG	NAG	DOC	MBC	MBN	NH_4^+ -N	C/N	$\text{H}_2\text{O}\%$
BG	1							
NAG	0.068	1						
DOC	-0.221	0.114	1					
MBC	0.246	-0.343	-0.333	1				
MBN	-0.173	-0.029	0.381	-0.648 **	1			
NH_4^+ -N	0.056	-0.071	-0.664 **	0.119	-0.386	1		
C/N	0.209	-0.106	-0.340	0.760 **	-0.942 **	0.368	1	
$\text{H}_2\text{O}\%$	-0.035	0.158	-0.017	0.299	-0.494 *	0.277	0.469 *	1

1) 黑色字体标出有显著或极显著相关关系; C/N 为 MBC/MBN, $\text{H}_2\text{O}\%$ 为烘干法测得数据

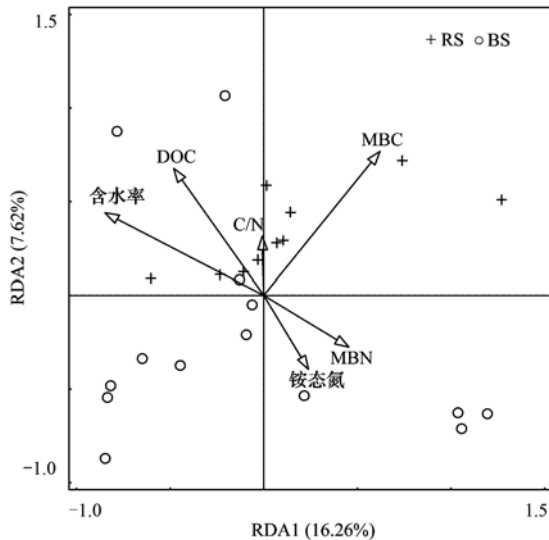


图4 影响酶活性因素的 RDA 分析

Fig. 4 RDA of influencing factors on enzyme activities

根际土壤胞外酶活性;而非根际土壤中酶活性的变化主要受 MBN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响。

3 讨论

3.1 施氮对水稻土壤酶活性的影响

氮素是作物生长和微生物繁殖必须的养分元素,水稻-土壤系统中水稻与微生物对氮素具有竞争关系,同时微生物也能够通过分泌碳氮转化相关的胞外酶来分解土壤有机质中的氮素,从而实现对氮素的反调控,达到土壤微生物生态物质平衡,满足水稻、微生物生长的计量学需求^[14,28]。本研究中相对于不施氮处理,氮肥添加增加了成熟期 BG 酶活性,而使水稻成熟期根际土壤 NAG 酶活性降低了 0.3 倍。这表明,氮肥添加后土壤中易利用态的 N 素含量增加(图 1),促进了微生物对土壤碳的利用,因而增加了碳转化酶活性(BG),而土壤外源矿质态 N 素的供应,降低了微生物对土壤有机质中 N 的依赖,从而降低了氮转化酶活性(NAG)^[29]。Pearson 相关分析结果表明,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 DOC 表现出极显著的相关性,这说明外源氮素是调控土壤碳源供给和微生物活性的关键因子。与本研究一致,梁国鹏等^[21]发现施氮能显著促进夏玉米生育期内根际土壤 BG 酶活性。但汪华等^[10]发现施氮在水稻生长旺盛期会降低土壤酶活性。氮肥的施加尽管对微生物量影响显著,但是方差分解结果(图 3)表明,施氮效应对酶活性的解释率仅为 0.2%,这一方面可能是土壤酶来源于微生物分泌物,氮肥施用改变土壤的养分状况,改善作物生长的营养条件,进而影响酶活

性^[21,30];另一方面,土壤中酶活性受多种生物和非生物因素的影响,水稻生长不同生育期内对养分的需求不同而导致土壤中养分重分配^[1,31],因此,氮素对土壤酶活性的影响并不是唯一因素,可能还有其他因素共同影响着土壤酶活性。

3.2 根际效应对水稻不同生育期土壤酶活性的影响

根际微环境是土壤微生物活跃区域,也是土壤酶活性的敏感区域,酶活性对土壤环境变化的响应明显^[4]。本研究中,相对于不施氮处理,施氮处理的水稻成熟期非根际土壤的 BG 和 NAG 酶催化效率显著高于根际土壤,这表明根际区域较高的有效态碳氮含量降低了微生物碳氮水解酶的分泌^[32]。同时,水稻生长至成熟期时,根际分泌物持续扩散到非根际区域,作为易降解的碳氮化合物(能够诱导蛋白酶合成的氨基酸和短肽)的来源,增加了非根际土壤 NAG 酶活性^[19],并加快土壤酶对土壤有机质中碳氮的分解作用。在土壤-微生物-根系互作系统中,为保证作物正常的养分需求,微生物加强对非根际土壤中几丁质和肽聚糖的分解,再通过菌根真菌供作物吸收利用^[6,33],从而使成熟期非根际土壤中有较高的 NAG 酶活性。

本研究发现根际因素对土壤酶活的解释率为 19.3%,是造成酶活性差异的主要因素。土壤酶活性是指示土壤微生物活性的指标之一,土壤酶活性不仅与微生物数量、功能基因表达等微生物本身性质密切相关,还与土壤环境因子变量紧密联系,如土壤水分含量、pH、Eh、金属离子含量等,所以土壤根际效应、生育期和施氮等指标不能 100% 解释土壤酶活性的变异,这 3 个变量对于土壤酶活性的变化的总的贡献率(或是解释率)只有 23.9%。Pearson 相关分析(表 3)发现根际土壤 BG 酶活性与 MBC 含量呈显著正相关,而非根际土壤 BG 酶活性与 MBC 含量无显著相关,这表明水稻生育期内非根际土壤 BG 酶活性可能受根际理化因素影响较大,掩盖了非根际土壤 BG 酶活性与 MBC 的关系。根际和非根际土壤 NAG 酶活性均分别与 DOC 含量呈显著负相关,而且根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低于非根际土壤,这表明水稻根际沉积能够刺激微生物生长,水稻与土壤微生物对养分的竞争作用减少矿质养分在根际区域的可利用态含量^[34];根际区域内根系分泌物不同程度的分解转化过程,对微生物生长有不同程度的刺激作用,也影响着土壤微生物胞外酶的分泌及其活性^[35,36]。

3.3 生育期对水稻土壤酶活性的影响

本研究中从水稻拔节期到成熟期施氮处理中, 土壤 BG 酶和 NAG 酶活性均逐渐降低; 多重比较 (表 2) 结果显示水稻生育期对 BG 酶活性的影响极显著, 施氮和生育期的交互作用对 BG 酶活性也有显著性影响; 同时, 水稻生育期、施氮和根际效应均极显著的影响了 NAG 酶活性. 这与曾路生等^[7]的研究结果一致, 水稻在不同生育期内对养分的需求不同, 其生长过程是土壤-微生物-水稻相互作用的结果^[7,29]. 施氮处理中, 随着水稻的生长土壤 NH_4^+ -N 含量显著降低, 而土壤 MBN 显著增加, 这表明水稻生长旺盛期由于根际分泌能力较强, 微生物生长繁殖也加强, 同时水稻植株对于养分的竞争吸收, 使土壤微生物增强胞外酶的分解, 水解土壤有机质为水稻和微生物提供更多的养分与能量^[37]; 水稻成熟期根际的分泌作用下降, 同时竞争吸收养分元素的能力也在减弱, 所以微生物胞外酶活性随之下降.

4 结论

(1) 施氮、根际效应和水稻生育期均对土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性有不同程度的影响, 但根际效应是其主要影响因素, 施氮和水稻不同生育期对土壤胞外酶活性的影响尽管较弱但不可忽略.

(2) 水稻生育期、施氮和根际效应及其交互作用均对 NAG 酶活性有极显著影响, 而施氮和生育期则显著影响了土壤 BG 酶活性.

(3) 土壤 MBC 和 DOC 含量主要影响水稻根际土壤胞外酶活性; 而非根际土壤中酶活性的变化主要受 MBN 和 NH_4^+ -N 的影响.

参考文献:

- [1] 徐雁, 向成华, 李贤伟. 土壤酶的研究概况[J]. 四川林业科技, 2010, **31**(2): 14-20.
Xu Y, Xiang C H, Li X W. Advances in soil enzymology[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2010, **31**(2): 14-20.
- [2] Burns R G. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, **14**(5): 423-427.
- [3] Burns R G, Dick R P. Enzymes in the environment: activity, ecology, and applications [M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [4] Nardi S, Concheri G, Pizzeghello D, et al. Soil organic matter mobilization by root exudates[J]. Chemosphere, 2000, **41**(5): 653-658.
- [5] Hawes M C, Bengough G, Cassab G, et al. Root caps and rhizosphere[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2002, **21**(4): 352-367.
- [6] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. Plant and Soil, 2009, **321**(1-2): 305-339.
- [7] 曾路生, 廖敏, 黄昌勇, 等. 水稻不同生育期的土壤微生物量和酶活性的变化[J]. 中国水稻科学, 2005, **19**(5): 441-446.
Zeng L S, Liao M, Huang C Y, et al. Variation of soil microbial biomass and enzyme activities at different developmental stages in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2005, **19**(5): 441-446.
- [8] Valé M, Nguyen C, Dambrine E, et al. Microbial activity in the rhizosphere soil of six herbaceous species cultivated in a greenhouse is correlated with shoot biomass and root C concentrations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(12): 2329-2333.
- [9] 杨良静, 何俊瑜, 张兴平. Cd 胁迫对水稻根际和非根际土壤酶活性的影响研究[J]. 六盘水师范学院学报, 2015, **27**(4): 10-14.
Yang L J, He J Y, Zhang X P. Effects of Cadmium (Cd) stress on enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils of rice[J]. Journal of Liupanshui Normal University, 2015, **27**(4): 10-14.
- [10] 汪华, 杨京平, 徐伟, 等. 分次施氮对水稻根际土壤微生物生态效应的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 123-126.
Wang H, Yang J P, Xu W, et al. Ecological effect of nitrogen fertilizer with split application on rice rhizosphere microbes in paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, **20**(4): 123-126.
- [11] Murray A H, Iason G R, Stewart C. Effect of simple phenolic compounds of heather (*Calluna vulgaris*) on rumen microbial activity in vitro[J]. Journal of Chemical Ecology, 1996, **22**(8): 1493-1504.
- [12] Jian S Y, Li J W, Chen J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **101**: 32-43.
- [13] 曹丛丛, 齐玉春, 董云社, 等. 氮沉降对陆地生态系统关键有机碳组分的影响[J]. 草业学报, 2014, **23**(2): 323-332.
- [14] 吴金水, 葛体达, 祝贞科. 稻田土壤碳循环关键微生物过程的计量学调控机制探讨[J]. 地球科学进展, 2015, **30**(9): 1006-1017.
- [15] Alberti G, Vicca S, Inglema I, et al. Soil C:N stoichiometry controls carbon sink partitioning between above-ground tree biomass and soil organic matter in high fertility forests [J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2015, **8**(2): 195-206.
- [16] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(5): 564-570.
Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, **8**(5): 564-570.
- [17] Li Y T, Rouland C, Benedetti M, et al. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress[J]. Soil Biology

- and Biochemistry, 2009, **41**(5): 969-977.
- [18] Gisbert M, Emran M, Pardini G, *et al.* The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability[J]. *Geoderma*, 2013, **202-203**: 51-61.
- [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] 夏雪, 谷洁, 车升国, 等. 施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(8): 1618-1627.
- Xia X, Gu J, Che S G, *et al.* Effects of Nitrogen Application Rates on Microbial Community and Enzyme Activities in Lou Soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(8): 1618-1627.
- [21] 梁国鹏, Albert H A, 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(6): 1917-1924.
- Liang G P, Albert H A, Wu H J, *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere of summer maize under different nitrogen application rates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(6): 1917-1924.
- [22] Zeglin L H, Stursova M, Sinsabaugh R L, *et al.* Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems[J]. *Oecologia*, 2007, **154**(2): 349-359.
- [23] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(6): 1918-1927.
- [24] Billings S A, Ziegler S E. Altered patterns of soil carbon substrate usage and heterotrophic respiration in a pine forest with elevated CO₂ and N fertilization[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(5): 1025-1036.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [27] 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.
- [28] Loepmann S, Blagodatskaya E, Pausch J, *et al.* Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency of exo-enzymes in rhizosphere and detritosphere [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **92**: 111-118.
- [29] 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.
- [30] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力[J]. *土壤通报*, 1980, **1**(6): 41-44.
- [31] 马维娜, 杨京平, 汪华. 不同水分模式分次施氮对水稻根际土壤微生物生态效应的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, **33**(2): 184-189.
- Ma W N, Yang J P, Wang H. Ecological effect of rice rhizosphere microbes under water regimes and nitrogen fertilizer with split application in paddy field[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2007, **33**(2): 184-189.
- [32] Zhu B, Gutknecht J L M, Herman D J, *et al.* Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **76**: 183-192.
- [33] Anderson R C, Liberta A E. Influence of supplemental inorganic nutrients on growth, survivorship, and mycorrhizal relationships of *Schizachyrium scoparium* (Poaceae) grown in fumigated and unfumigated soil[J]. *American Journal of Botany*, 1992, **79**(4): 406-414.
- [34] Casavant N C, Thompson D, Beattie G A, *et al.* Use of a site-specific recombination-based biosensor for detecting bioavailable toluene and related compounds on roots [J]. *Environmental Microbiology*, 2003, **5**(4): 238-249.
- [35] Falchini L, Naumova N, Kuikman P J, *et al.* CO₂ evolution and denaturing gradient gel electrophoresis profiles of bacterial communities in soil following addition of low molecular weight substrates to simulate root exudation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(6): 775-782.
- [36] Landi L, Valori F, Ascher J, *et al.* Root exudate effects on the bacterial communities, CO₂ evolution, nitrogen transformations and ATP content of rhizosphere and bulk soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 509-516.
- [37] Kumar A, Kuzyakov Y, Pausch J. Maize rhizosphere priming: field estimates using ¹³C natural abundance[J]. *Plant and Soil*, 2016, **409**(1-2): 87-97.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)