

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM_{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价 李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)

冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)

基于区域传输矩阵和 PM_{2.5} 达标约束的大气容量计算方法 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)

利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)

重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)

杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)

城市生活垃圾露天焚烧 PM_{2.5} 及其组分排放特征 王艳, 郝伟伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)

民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)

大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析 纪德钰 (3535)

“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)

浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)

有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)

基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 胡俊, 元燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)

基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)

北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)

丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)

太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)

太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)

台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)

珠江三角洲高钾地下水赋存环境特征及成因分析 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)

有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)

澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)

碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)

浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)

人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)

外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N₂O 排放影响 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)

雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)

水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)

Co₃O₄/BIVO₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)

海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制 于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)

磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 赵华轩, 郎印海 (3729)

污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)

阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)

普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞 (3759)

PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕锋, 夏四清 (3767)

苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)

反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)

好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钊珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)

苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)

污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)

生物炭对华北农田土壤 N₂O 通量及相关功能基因丰度的影响 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)

设施菜田土壤 N₂O 产生对 O₂ 的响应 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)

利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)

南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)

Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)

基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)

生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 赵鹏宇, 李磊, 柴宝峰 (3876)

转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)

脱硫石膏对稻田 CH₄ 释放及其功能微生物种群的影响 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)

长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)

黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)

黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)

氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)

有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许新 (3937)

中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO₂ 排放 林婷, 吴焯, 何晓漪, 张少君, 郝吉明 (3946)

气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)

《环境科学》征订启事 (3543) 《环境科学》征稿简则 (3570) 信息 (3600, 3728, 3844)

长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征

杜林森^{1,2}, 唐美铃^{2,3}, 祝贞科^{2,4*}, 魏亮², 魏晓梦², 周萍², 葛体达², 王久荣², 邹冬生^{1*}, 吴金水²

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 4. 湖南省农业科学院农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 与稻田土壤碳周转密切相关的酶活性是评价土壤肥力和肥料管理的重要指标. 本研究选取秸秆还田 (ST)、化肥 (NPK) 和不施肥 (CK) 的长期定位试验田, 以 10 cm 的间距分段采集土壤剖面 0~40 cm 范围内的新鲜土样, 利用 96 微孔酶标板荧光分析法, 测定参与土壤碳氮转化过程关键酶 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, 探讨不同施肥措施对不同深度土壤酶活性的影响. 结果表明, 相比不施肥的土壤, 施用化肥和秸秆土壤的 BG 酶活性分别提高了 35%~118% 和 55%~342%; NAG 酶活性分别提高了 9%~30% 和 102%~484%. 同时, 随着土层深度的增加, 土壤酶活性逐渐降低, 0~20 cm 深层土壤酶活性显著高于 20~40 cm 深层土壤. 在不同施肥措施中秸秆还田可高程度影响稻田深层土壤. RDA 分析表明土壤碳氮含量主要与 0~20 cm 的土壤酶活性有显著的正相关关系, 与 20~40 cm 的土壤酶活性呈负相关关系. 综上所述, 随着土壤深度增加土壤微生物量和土壤酶活性显著降低. 长期施肥显著提高了不同深度土壤微生物量和土壤酶活性, 其中秸秆还田作用尤为突出. 因此, 合理的秸秆还田有利于改善稻田深层土壤肥力, 优化农田土壤养分循环, 为作物生长提供良好的土壤环境.

关键词: 水稻土; 长期施肥; 土层; 酶活性; 碳氮水解酶; 米氏方程

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3901-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201711234

Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles

DU Lin-sen^{1,2}, TANG Mei-ling^{2,3}, ZHU Zhen-ke^{2,4*}, WEI Liang², WEI Xiao-meng², ZHOU Ping², GE Ti-da², WANG Jiu-rong², ZOU Dong-sheng^{1*}, WU Jin-shui²

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Life Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 4. Key Laboratory of Agricultural Environment in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: The enzyme activity, which is closely related to soil material cycling (mineralization, transformation, etc.), can reflect soil quality and nutrient status. In order to explore the effect of long-term fertilization on the enzyme activity in paddy soil profile (0-40 cm), soils with organic fertilizer and inorganic fertilizer, and non-fertilized soils were selected, and the carbon and nitrogen contents, and the activities of β -1,4-glucosidase (BG), and β -1,4-*N*-acetylglucosaminidase (NAG) in 10cm depths of soil were analyzed. The results showed that the activities of BG and NAG in the soils treated with inorganic fertilizer and organic fertilizer increased by 0.73-47.87 nmol·(g·h)⁻¹ and 1.33-128.81 nmol·(g·h)⁻¹, and 0.19-9.72 nmol·(g·h)⁻¹ and 0.92-57.66 nmol·(g·h)⁻¹, respectively, compared to those for non-fertilized soil. Soil enzyme activity decreased with increasing soil depth. Soil enzyme activity in soil from 0-20 cm was significantly higher than that of soil from 20-40 cm. Soil enzyme activities were significantly affected by long term fertilization at different soil depths. RDA analysis showed that soil carbon and nitrogen contents had significant positive relationships with the activities of BG and NAG in the 0-20 cm soil profiles, however, negative relationships were observed in the 20-40 cm soil profiles. The long-term application of organic fertilizer significantly increased soil biomass and enzyme activity, both of which decreased with the increase in soil depth. Long-term fertilization could increase soil nutrient contents, microbial biomass, and extracellular

收稿日期: 2017-11-25; 修订日期: 2018-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300902); 国家自然科学基金项目 (41501321); 湖南省自然科学基金项目 (2016JJ3132, 2016JJ2136); 农业部长江中游平原农业环境重点实验室开放基金项目

作者简介: 杜林森 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: 070220dn@sina.com

* 通信作者, E-mail: zhuzhenke@isa.ac.cn; zoudongsheng2@sina.com

enzyme activities, which has important theoretical significance for optimizing farmland fertilizer management and improving soil productivity.

Key words: paddy soil; long-term fertilization; soil profile; enzyme activity; carbon and nitrogen hydrolytic enzyme; Michaelis-Menten equation

在农业生产发展历程中, 由于对土地高强度的利用和高附加值的追求, 施肥已成为保障粮食安全和作物产量的关键措施. 长期合理的肥料投入能有效提高土壤肥力, 促进微生物对土壤养分的活化, 提高作物对养分的利用效率^[1]. 众多研究表明, 长期施肥能够促进土壤有机质的增加, 改善了土壤生态环境^[2,3]. 土壤是一个复杂的空间缓冲体系, 不同深度土壤理化性质和微生物环境迥然不同^[4]. 长期培肥不仅对表层土壤养分状况有重要调控作用, 还作用于深层农田土壤. 土壤剖面养分指标在一定水平上可以反映长期培肥效应的作用深度及其影响空间范围. 尽管如此, 目前长期施肥对土壤生态环境差异的研究尚为缺乏, 还主要停留在耕作层施肥效益的探索, 其对不同深度土壤环境的影响及其微生物响应过程还不明确.

在土壤-植物系统的碳氮养分循环中, 土壤酶活性与土壤功能密切相关, 能够反映土壤养分状况, 是具有潜力的土壤生态功能指标^[5]. 其中, β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)是参与土壤纤维素降解的重要酶, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)则参与了氮循环中几丁质和肽聚糖的降解过程, 这两种酶表征着土壤碳氮循环的重要过程^[5,6]. 农田生态系统中土壤酶活性与养分指标存在显著相关关系, 易受到灌溉、施肥等人为农田管理措施的影响^[7]. 田善义等^[8]的研究表明化肥和秸秆的施用均能够不同程度地提高BG和NAG等参与碳氮过程的关键酶活性, 改变土壤养分状况. 同时, 也有研究表明不同施肥措施也影响着各个土层酶活性的大小. 邱莉萍等^[9]和Wang等^[10]均发现, 随着土层加深, 不同施肥处理的土壤酶活性逐渐降低. 以往的研究往往集中于施肥对酶活性的影响程度方面, 缺乏对不同深度土壤酶活性的关注, 而研究不同土层长期施肥的土壤酶活性有助于认识土壤在剖面尺度上对施肥措施的响应, 为揭示土壤生态过程的调控机制奠定理论基础.

在稻田生态系统中, 土壤耕作层一般为0~20 cm, 根系发达区为0~10 cm, 而施肥和灌溉等农田管理措施可间接影响深层土壤生态环境条件. 然而, 长期施肥对土壤剖面的养分差异特征及酶活性的影响的研究较为缺乏. 因此, 为深入理解土壤碳

氮养分循环规律, 优化农田肥料管理措施, 本文特以38a长期施肥的定位试验水稻土为研究对象, 选取了两种碳氮过程关键酶(BG和NAG), 探讨化肥施用和秸秆还田对土壤酶活性的影响, 分析长期施肥条件下不同土层的养分转化及其土壤酶活性变化特征, 以期为后续深入研究土壤生态过程的酶学调控机制奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

供试土壤选自宁乡县农业技术推广中心(113°00'20"E, 28°25'16"N, 亚热带典型湿润气候, 年平均温度17.5℃, 降雨量1300 mm, 日照1663 h). 该土壤选取于38年长期定位施肥试验田, 样地种植制度采用早水稻-晚水稻-冬闲制. 本研究采用其中3种常规施肥处理, 分别是: ①全化肥处理(NPK): 仅施氮磷钾化肥; ②秸秆还田+化肥处理(ST): 施用上一年度晚稻收割的秸秆和化肥; ③无肥对照(CK): 不施加任何肥料. 选择0~10、10~20、20~30、30~40 cm不同土层的土壤碳氮相关酶(BG、NAG)作为研究对象.

种植小区面积为28.22 m², 每个处理设3次重复, 随机区组排列. 全化肥处理(NPK)每公顷分别施60 kg氮[(NH₄)₂SO₄], 30 kg磷(P₂O₅)和60 kg钾(K₂O); 秸秆还田+化肥处理(ST)以施用上年度秸秆为主, 若总氮量不足用化肥补足; 其中, 早季稻秸秆还田量为2775.0 kg·hm⁻², 晚季稻秸秆还田量为3600.0 kg·hm⁻². 于2017年5月中旬, 对每个试验小区内采用五点法分别采集土样, 土壤剖面0~40 cm范围内按10 cm的间距分段取样. 土样采集后在24 h内运回实验室, 在室内剔除根系等后过2 mm筛, 酶活性和微生物生物量的待测土样于4℃条件下保存并迅速测定; 部分土样风干后过0.15 mm筛后用于土壤基本理化性质测定(表1).

1.2 指标测定及方法

用Mettler-toledo320 pH计按水土比2.5:1测定土壤pH; 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N, 德国)测定(干烧法); 土壤溶解性有机碳(DOC, mg·kg⁻¹)含量采用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液浸提, 有机碳分析仪(岛津Vwp,

日本)测定;土壤微生物生物量碳氮(MBC、MBN, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均采用氯仿熏蒸提取,其中MBC采用有机碳分析仪(岛津 Vwp, 日本)测定,MBN 采用流动注

射仪(Fiastar 5000, 瑞典福斯)测定^[11]. 土壤碱解氮(Alkeline-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^[12].

表 1 土壤基本性质

Table 1 Characteristics of the paddy soils used in this study

处理	土层/cm	容重 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%	pH	有机质 $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比(C/N)
CK	0~10	1.26	6.56	71.62	21.80	7.15	17.48	1.81	4.82
	10~20	1.62	7.27	74.45	18.27	7.40	15.89	2.17	7.34
	20~30	1.73	11.40	75.11	13.48	7.52	6.59	1.74	3.79
	30~40	1.76	11.72	78.62	9.65	7.61	5.48	1.71	3.21
NPK	0~10	1.22	6.43	73.80	19.76	6.48	18.32	1.85	8.67
	10~20	1.31	6.79	76.01	17.19	6.82	16.22	1.70	9.53
	20~30	1.65	10.02	77.50	12.47	7.21	9.49	1.33	7.12
	30~40	1.72	12.98	82.29	4.72	7.25	6.05	1.19	5.08
ST	0~10	1.20	6.00	66.98	27.01	6.64	22.04	2.20	4.85
	10~20	1.56	5.43	67.89	26.66	6.64	20.36	2.26	9.01
	20~30	1.55	9.40	75.62	14.97	6.84	12.23	1.79	6.84
	30~40	1.52	13.05	82.70	4.24	7.12	6.24	1.53	4.07

两种土壤酶活性(BG 与 NAG)均采用 96 微孔酶标板荧光分析法测定^[13]. 具体步骤如下:称取 1.00 g 新鲜土壤于乐扣盒中,加入 50 mL 灭菌水, $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 30 min, 用磁力搅拌器边搅拌边加样 50 μL 于每孔,并加入 50 μL MES 缓冲溶液($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_4\text{SNa}_{0.5}$),设置底物浓度梯度为 0、20、40、60、100、200、600、800 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 每孔加底物(4-Methylumbelliferyl-*N*-Acety- β -D-Glucosaminide, 4-Methylumbelliferyl- β -D-Glucoside)100 μL . 同时设置 0、100、200、500、800、1 200 $\text{pmol}\cdot\text{孔}^{-1}$ 的标线. 分别于加入底物第 0、30、60、120、180 和 240 min 借助多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL, Thermo)测定荧光强度.

1.3 数据处理和统计分析

测定的荧光强度差换算为酶活性,之后采用米氏方程 Michaelise-Menten 进行拟合:

$$V = \frac{V_{\max} \times [S]}{K_m + [S]}$$

式中, V 为反应速率 [$\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]; V_{\max} 为最大反应速率 [$\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]; K_m 为底物亲和性 ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$); $[S]$ 为底物浓度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$).

$$K_a = \frac{V_{\max}}{K_m}$$

式中, K_a 为催化效率.

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 Canoco5 实现.

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下土壤碳氮含量的剖面分布

在经过 38 a 培肥处理后,施用秸秆和化肥土壤中 C、N 含量是不施肥处理土壤的 1.1 ~ 13.7 倍. 土壤 C、N 含量随着土壤深度的增加而逐渐降低,在 0 ~ 30 cm 深层土壤中,施用秸秆处理土壤 C、N 含量显著高于不施肥和单施化肥处理,而在 30 ~ 40 cm 土壤中,不同施肥处理之间 C、N 含量差异不显著(图 1). 在 0 ~ 30cm 土层中,和纯施化肥的土壤相比,施用秸秆的土壤中 DOC、MBC、SOC、Alkeline-N、MBN 和 TN 含量分别提高了 2% ~ 8%、2% ~ 53%、25% ~ 33%、15% ~ 35%、20% ~ 63% 和 18% ~ 25%; 相比不施肥土壤,秸秆的土壤中 DOC、MBC、SOC、Alkeline-N、MBN 和 TN 含量分别提高了 19% ~ 105%、15% ~ 130%、22% ~ 83%、39% ~ 109%、88% ~ 179% 和 31% ~ 58%. 长期施肥和土层均显著影响土壤 DOC、MBC、SOC、Alkeline-N、MBN 和 TN 含量变化,而两者交互作用显著影响土壤 DOC、MBC、SOC、Alkeline-N、MBN 和 TN 含量变化(表 2).

2.2 不同深层土壤酶活性对施肥的响应

长期使用化肥和秸秆提高了土壤葡萄糖水解酶(BG)和乙酰水解酶(NAG)活性,相比不施肥的土壤,施用化肥和秸秆的土壤 BG 酶活性分别提高了

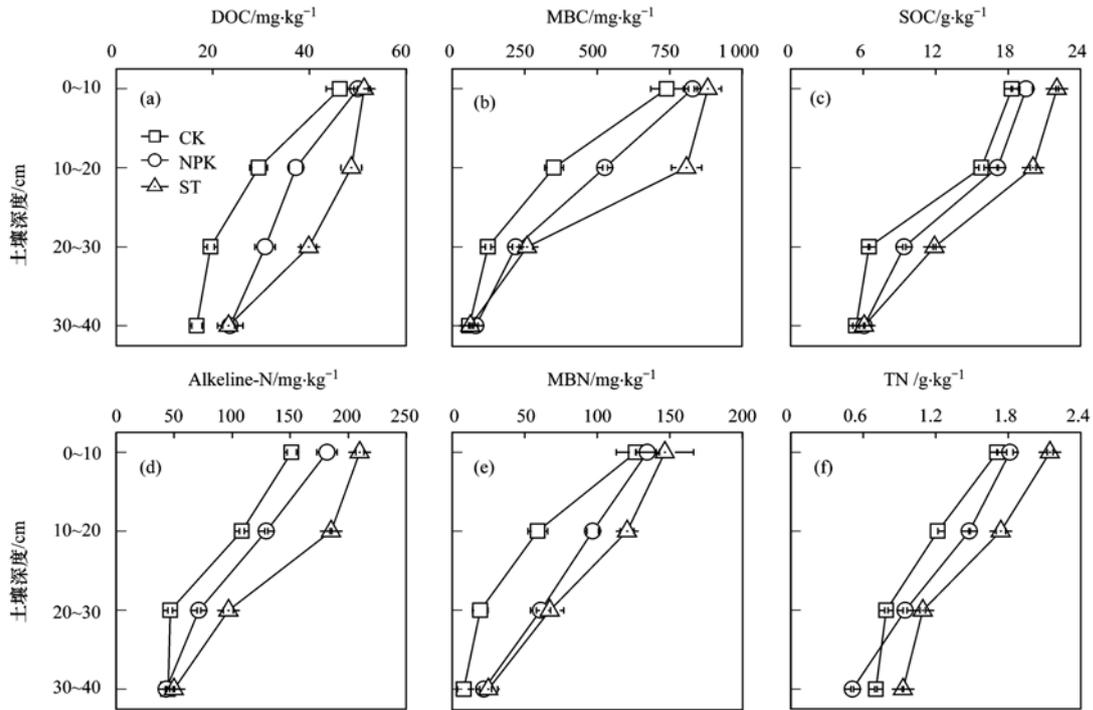


图 1 不同施肥处理下不同深层土壤 C、N 的含量

Fig. 1 Soil C and N contents in different soil depths under different conditions of fertilizer application

表 2 施肥处理和土层深度对土壤碳氮含量影响的多重性比较¹⁾

Table 2 Effects of fertilization and soil depth on soil carbon and nitrogen contents

影响因素	DOC	MBC	SOC	Alkeline-N	MBN	TN
施肥	91.9 **	110.8 **	3 731.5 **	897.4 **	14.4 **	490.1 **
土层	10 096.6 **	1 510.7 **	144 782.4 **	24 517.1 **	275.8 **	25 414.6 **
施肥 × 土层	35.3 **	29.3 **	1 445.2 **	353.9 **	3.9	164.9 **

1) 表中数据和星号为 F 值和显著水平, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

35% ~ 118% 和 55% ~ 342%; NAG 酶活性分别提高了 9% ~ 30% 和 102% ~ 484%; 同时, 相比化肥处理, 秸秆提高了 0 ~ 10 cm 土壤 BG 酶活性, 却降低了 10 ~ 20 cm 土壤 BG 酶活性, 而秸秆处理提高了各个土层的 NAG 酶活性(图 2).

由表 3 可知, 土壤最大酶活性潜势 (V_{max}) 随土壤深度的增加而逐渐降低; 从 0 ~ 10 cm 到 30 ~ 40 cm, CK 处理的 BG 酶与 NAG 酶明显降低, 化肥处理与秸秆处理呈现与 CK 处理相同的趋势. 相比不施肥处理, 施用化肥土壤中 BG 酶提高了 3.5 倍(0 ~ 10 cm)、4.2 倍(10 ~ 20 cm)、9.7 倍(20 ~ 30 cm)、4.3 倍(30 ~ 40 cm); NAG 酶的最大酶活性提高了 2.0 倍(0 ~ 10 cm)、3.0 倍(10 ~ 20 cm)、2.4 倍(20 ~ 30 cm)、5.8 倍(30 ~ 40 cm). 相比施化肥处理, 施用秸秆的土壤中 BG 酶提高了 1.6 倍(0 ~ 10 cm)、4.3 倍(10 ~ 20 cm)、4.3 倍(20 ~ 30 cm)、2.8 倍(30 ~ 40 cm); NAG 酶的最大酶活性提高了

1.6 倍(0 ~ 10 cm)、2.7 倍(10 ~ 20 cm)、2.2 倍(20 ~ 30 cm)、4.5 倍(30 ~ 40 cm). 在 3 种不同施肥管理中, BG 酶和 NAG 酶的 K_m 均从土壤表层至深层缓慢改变, 无显著变化; 另外, 相较于不施肥和施用化肥的土壤相比, 施用秸秆的土壤对不同土层的土壤酶活参数 K_a 的影响更为显著.

2.3 土壤生物化学因子变化对土壤酶活性的影响

土壤酶活性的变化受到多重因素的影响. 对影响不同施肥处理下不同深层土壤酶活性的主要因子 (DOC、MBC、SOC、Alkeline-N、MBN、TN) 进行 RDA 分析发现(图 3), 土壤碳氮含量与 0 ~ 20 cm 土壤中 BG 酶活性表现正相关关系, 尤其对 0 ~ 10 cm 土壤中 BG 酶活性的影响较强, 而与 20 ~ 40 cm 土壤中 BG 酶活性表现负相关关系. 土壤碳氮含量对土壤中 NAG 酶活性影响在不同施肥处理条件下略有不同, 土壤碳氮含量主要与 CK 和 ST 处理中 0 ~ 20 cm 土壤中 NAG 酶活性表现正相关关系, 与

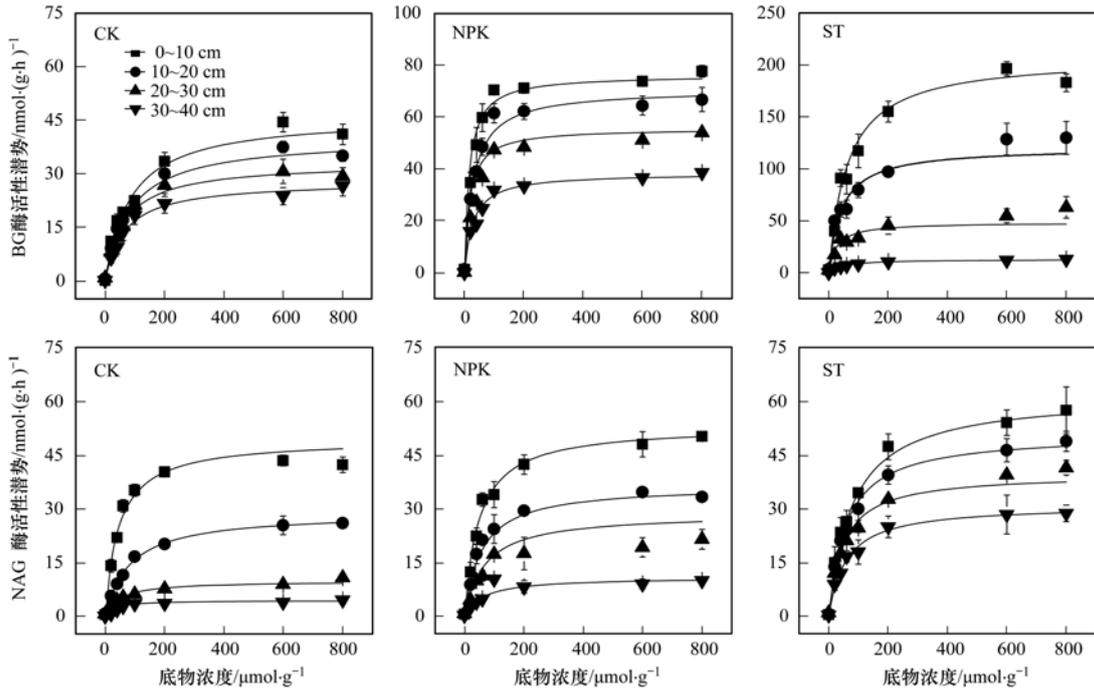


图 2 不同施肥处理条件下各深层土壤酶活性动力学

Fig. 2 Enzyme kinetics in soil profiles with different conditions of fertilizer application

表 3 不同施肥方式下各土层土壤酶活性动力学参数

Table 3 Dynamic parameters of soil enzyme activity in soils under different conditions of fertilizer application

处理	土层 cm	BG			NAG		
		V_{max} / $\text{nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$	K_m / $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	K_a	V_{max} / $\text{nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$	K_m / $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	K_a
CK	0~10	47.76 ± 2.28a	87.64 ± 22.75a	0.56 ± 0.11a	50.94 ± 3.17a	47.82 ± 13.9a	1.13 ± 0.33a
	10~20	28.41 ± 3.72b	69.62 ± 30.04a	0.44 ± 0.11a	29.48 ± 3.74b	52.43 ± 11.08ab	0.57 ± 0.06b
	20~30	5.81 ± 0.45c	87.03 ± 10.0a	0.07 ± 0.0b	10.74 ± 1.85c	79.72 ± 54.45bc	0.17 ± 0.07c
	30~40	2.74 ± 0.12c	54.12 ± 7.12a	0.05 ± 0.0b	4.29 ± 0.49c	51.33 ± 7.9c	0.08 ± 0.01d
NPK	0~10	77.15 ± 1.53a	23.29 ± 7.11b	3.50 ± 0.91a	63.47 ± 7.21a	63.6 ± 8.93a	1.00 ± 0.04a
	10~20	38.35 ± 8.95b	34.49 ± 6.33b	1.13 ± 0.25b	32.25 ± 3.95b	57.15 ± 7.96a	0.57 ± 0.02b
	20~30	12.66 ± 0.31c	46.83 ± 13.84b	0.29 ± 0.08bc	11.71 ± 0.7c	45.48 ± 10.64a	0.27 ± 0.09c
	30~40	4.15 ± 0.28c	97.46 ± 22.24a	0.04 ± 0.01c	5.59 ± 0.94d	40.52 ± 18.11a	0.02 ± 0.0c
ST	0~10	168.11 ± 11.12a	63.71 ± 4.19a	1.88 ± 0.19a	103.19 ± 5.58a	10.62 ± 0.99a	9.79 ± 1.3a
	10~20	119.60 ± 11.95b	62.61 ± 7.76a	2.72 ± 0.47b	87.09 ± 5.84b	17.06 ± 2.31a	5.14 ± 0.34b
	20~30	56.02 ± 3.44c	63.06 ± 21.65a	0.95 ± 0.26c	25.43 ± 0.65c	15.74 ± 3.2a	1.67 ± 0.38c
	30~40	11.72 ± 0.47d	49.27 ± 15.29a	0.25 ± 0.08d	25.07 ± 4.31c	18.73 ± 8.81a	1.47 ± 0.41c

1) 通过米氏方程拟合, 上述拟合结果均满足 $R^2 > 0.9$; 表中数值后不同小写字母表示同一处理不同土层酶活参数显著性差异 ($P < 0.05$)

NPK 处理中 20~30cm 土壤中 NAG 酶活性表现出较强的正相关关系; ST 处理中 TN 与 20~30 cm 土壤中 BG 和 NAG 酶活性表现出较强的正相关关系。

3 讨论

3.1 长期施肥管理对水稻土壤酶活性的影响

土壤中氮磷元素是水稻生长的必需养分, 长期施用化肥和秸秆可以提高稻田土壤养分, 促进水稻生长, 增加根系分泌物和凋落物等向土壤中输入,

进而促进土壤微生物陈新代谢, 增加土壤微生物量^[14,15]。本研究中, 长期施用化肥和秸秆导致土壤耕作层(0~30 cm)中碳氮含量以及微生物量碳氮显著高于不施肥处理(图 1), 表明不同肥料的投入均能够直接增加土壤碳氮含量, 同时也能够改善土壤理化性质, 更有利于土壤微生物生长繁殖, 进而增加土壤微生物量^[16,17]。

土壤中的酶主要来源于土壤微生物和植物根系分泌, 也有部分依靠动植物残体分解而形成, 通常

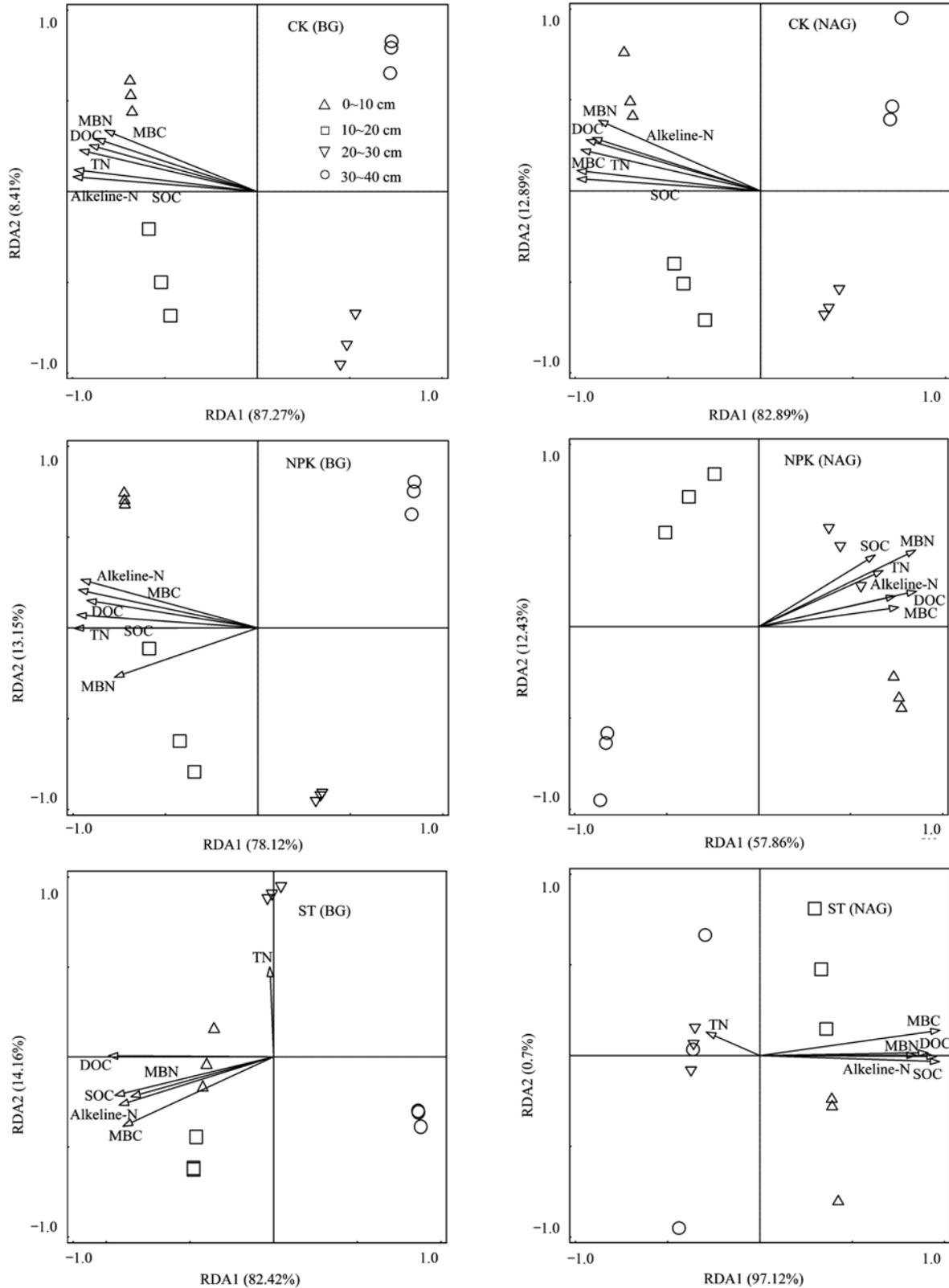


图 3 影响酶活性因素的 RDA 分析

Fig. 3 RDA analysis of factors influencing enzyme activities

被看作评价土壤质量的生物活性指标，在土壤生态系统中起重要作用^[18,19]。化肥和秸秆的长期投入，在增加土壤碳氮含量的同时，提高了土壤酶活性，

加快土壤碳氮的周转^[20]。本研究表明长期施肥条件下，土壤 BG 和 NAG 酶活性总的趋势是施用秸秆高于施用化肥，施肥高于不施肥。相比较施用化肥

处理, 秸秆施用对提高土壤酶活性效果更佳, 这是因为秸秆本身含有大量的酶类, 而且和组分简单的化肥相比, 秸秆可以为产酶微生物提供丰富多样的营养源, 促进了土壤的生化过程^[3,21]; 另外随营养元素的施入, 作物生长加速, 根系分泌物增加, 相应地土壤酶类活性增加^[22]. 土壤中的大部分酶属于诱导酶类, 其活性和数量受底物可利用性和微生物自身对养分需求的限制^[8]. 本研究中酶活性的变化趋势与微生物量碳氮, 有机碳和全氮的变化趋势基本一致, 这表明土壤微生物元素组成和土壤元素之间存在化学计量平衡, 微生物通过调控酶的分泌来增加其对限制性养分的吸收, 实现自身对养分吸收的平衡, 因此土壤酶活性也反映了微生物养分限制状况和养分有效性^[23,24].

3.2 水稻土壤不同深层酶活性对长期施肥的响应

同一土壤剖面上由于上、下土层性质存在差异, 特别是土壤容重、水分、有机质含量以及土壤孔隙等物理化学性质的不同, 造成微生物活性在不同土层间差别较大. 土壤酶活性作为微生物活性的重要指标, 其不同土层中存在显著的差异^[25]. 本研究结果表明, 随着土层加深土壤 BG 和 NAG 酶活性逐渐降低. 不同施肥处理下, 土壤酶活性及变化量在不同土层中的总体排列顺序为: 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm > 30~40 cm, 这与 Wang 等^[26]的研究结果相一致. 间接说明随着土层的加深, 土壤的养分状况逐渐变差, 越不适宜作物生长.

长期施肥处理不仅影响土体中碳氮总含量, 也影响各个土层中可利用态碳氮含量, 土壤 C、N 含量随着土壤深度的增加而逐渐降低, 施用秸秆处理和化肥土壤中 C、N 含量是不施肥处理土壤的 1.1~13.7 倍(图 1). 受到长期施肥影响, 各土层碳氮含量产生不同程度变化^[27], 土壤胞外酶作为碳氮转化的动力源, 对各个施肥处理下不同土层中碳氮含量的响应也有所不同^[28]. RDA 分析表明土壤碳氮含量主要与 0~20 cm 土壤酶活性有显著的正相关, 与 20~40 cm 土壤酶活性呈负相关关系. 这可能是因为 0~20 cm 土壤中碳氮含量相对充裕, 满足微生物生长需求, 促进了胞外酶的释放; 而接近犁底层的 20~40 cm 土壤中养分输入较少, 微生物处于养分受限状态, 微生物活性较低, 所以因施肥而输入的养分破坏了微生物元素平衡, 降低了微生物对碳氮转化关键酶的分泌^[28]. 此外, 酶活性随着土层加深而降低还可能因为深层土壤容重过大导致

土壤三相比失调, 尤其是高容重土壤氧气含量低于低容重土壤, 致使底层土壤好氧微生物活性下降, 相应地酶活性下降^[24,29]. 因此, 在农业生产中可以通过深耕松土措施, 降低土壤容重, 改善土壤物理结构, 提高土壤酶活性, 从而改善作物生境提高产量^[30].

4 结论

(1) 长期施用化肥和秸秆还田显著提高了土壤碳氮含量及其微生物量, 不同程度地增加了不同土层 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. 同时, 相比化肥处理, 秸秆提高了 0~10 cm 土壤 BG 酶活性, 却降低了 10~20 cm 土壤 BG 酶活性, 而秸秆处理提高了各个土层的 NAG 酶活性.

(2) 稻田土壤中, 随着土层深度的增加, 土壤 BG 和 NAG 酶活性逐渐降低. 相较于不施肥和施用化肥的土壤相比, 施用秸秆的土壤对不同土层的土壤酶活参数的影响更为显著.

(3) RDA 分析发现, 在不同施肥处理中 BG 酶与 0~20 cm 土壤碳氮含量有显著的正相关关系, 与 20~40 cm 土壤碳氮含量有显著的负相关关系; 而 NAG 酶与不同深层土壤碳氮含量关系略有不同; ST 处理中 TN 与 20~30 cm 土壤中 BG 和 NAG 酶活性表现出较强的正相关关系.

(4) 长期秸秆还田和施用化肥提高了土壤微生物生物量以及酶活性. 相较于施用化肥, 秸秆还田对酶活性影响土壤深度更深. 因此, 长期合理施肥以及土壤深耕等措施, 能够有效改善土壤物理结构, 增加土体以及深层土壤养分含量, 提高养分利用效率, 最终增加作物产量.

参考文献:

- [1] 郭萍, 文庭池, 董玲玲, 等. 施肥对土壤养分含量、微生物数量和酶活性的影响[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(3): 362-366.
Guo P, Wen T C, Dong L L, et al. Effect of fertilizer to content of soil nutrient, amount of soil microorganism and soil enzyme activities[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(3): 362-366.
- [2] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1093-1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1093-1099.
- [3] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 等. 施肥和土壤管理对土壤微生物

- 物生物量碳、氮和群落结构的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(1): 32-42.
- Bi M L, Yu W T, Jiang Z S, *et al.* Effects of fertilization and soil management on microbial biomass and community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(1): 32-42.
- [4] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(5): 950-960.
- Chen X F, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(5): 950-960.
- [5] Chen R R, Blagodatskaya E, Senbayram M, *et al.* Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, **45**: 221-229.
- [6] Tang W J, Fernandez J G, Sohn J J, *et al.* Chitin is endogenously produced in vertebrates [J]. *Current Biology*, 2015, **25**(7): 897-900.
- [7] 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.
- [8] 田善义, 王明伟, 成艳红, 等. 化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(15): 4963-4972.
- Tian S Y, Wang M W, Cheng Y H, *et al.* Long-term effects of chemical and organic amendments on red soil enzyme activities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(15): 4963-4972.
- [9] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶分布[J]. 生态学报, 2006, **26**(2): 364-372.
- Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A, *et al.* Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(2): 364-372.
- [10] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2006, **37**(2): 263-267.
- Wang D M, Wang C Z, Han X R, *et al.* Effects of long-term application of fertilizers on some enzymatic activities in Brunisolic soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(2): 263-267.
- [11] 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.
- [12] Li Y, Wu J S, Liu S L, *et al.* Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(4): GB4002.
- [13] Razavi B S, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Nonlinear temperature sensitivity of enzyme kinetics explains canceling effect—a case study on loamy haplic Luvisol [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 1126.
- [14] 魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 等. 水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3489-3496.
- Wei L, Tang Z Z, Zhu Z K, *et al.* Responses of extracellular enzymes to nitrogen application in rice of various ages with rhizosphere and bulk soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3489-3496.
- [15] 杭玉浩, 王强盛, 许国春, 等. 稻田土壤养分特性对不同耕作方式的生态响应[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(10): 106-112.
- Hang Y H, Wang Q S, Xu G C, *et al.* Ecological response of nutrient properties of paddy field to different tillage practices [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(10): 106-112.
- [16] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(17): 5502-5511.
- Ma X X, Wang L L, Li Q H, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(17): 5502-5511.
- [17] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.
- Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 676-684.
- [18] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(21): 1-7.
- Liu S J, Xia X, Chen G M, *et al.* Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(21): 1-7.
- [19] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 176-182.
- Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(1): 176-182.
- [20] 王光华, 齐晓宁, 金剑, 等. 施肥对黑土农田土壤全碳、微生物量碳及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2007, **38**(4): 661-666.
- Wang G H, Qi X N, Jin J, *et al.* Effect of fertilization on total soil C, microbial biomass C and soil enzyme activities in farmland black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(4): 661-666.
- [21] 高瑞, 吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, **13**(1): 143-145.
- Gao R, Lv J L. Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located utilization of different fertilizers [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, **13**(1): 143-145.
- [22] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(3): 525-533.
- Song Z Z, Li X H, Li J, *et al.* Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(3): 525-533.
- [23] Stone M M, Deforest J L, Plante A F. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luquillo Critical Zone Observatory [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 237-247.
- [24] 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.
- [25] 王群, 赵亚丽, 张学林, 等. 不同土层容重对玉米根系生长及土壤酶活性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2012, **46**(6): 624-630.
- Wang Q, Zhao Y L, Zhang X L, *et al.* Effects of subsoil bulk density on root growth and soil enzyme activities during the growth of corn (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, **46**(6): 624-630.
- [26] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(4): 82-85, 89.
- Wang G L, Duan J N, Jia N F, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(4): 82-85, 89.
- [27] 兰宇, Asshraf M I, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 264-270.
- Lan Y, Asshraf M I, Han X R, *et al.* Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 264-270.
- [28] Wakelin S A, Macdonald L M, Rogers S L, *et al.* Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 803-813.
- [29] Ndayegamiye A, Côté D. Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, **69**(1): 39-47.
- [30] 俄胜哲, 杨志奇, 罗照霞, 等. 长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, **36**(1): 104-110.
- E S Z, Yang Z Q, Luo Z X, *et al.* Effect of long-term fertilization on wheat yield and nutrient content of loessial soil on Loess Plateau [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, **36**(1): 104-110.



CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, et al. (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, et al. (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, et al. (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, et al. (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, et al. (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, et al. (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, et al. (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, et al. (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, et al. (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, et al. (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, et al. (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, et al. (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, et al. (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, et al. (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, et al. (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, et al. (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, et al. (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)