

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎春,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

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 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

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

黄容, 高明*, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 以西南丘陵山区紫色土为研究对象, 2013~2014 年在重庆市江津区先锋镇布置田间试验, 采用一年两熟, 水稻-儿菜轮作制度, 分析了秸秆还田与化肥减量配合施用对作物产量, 土壤养分及酶活性的影响, 为稻-菜轮作系统中养分资源优化管理的施肥方式提供科学依据, 实现农业秸秆的循环利用. 结果表明, 秸秆还田与化肥减量配施处理能提高水稻和儿菜的产量, 分别比常规施肥处理(F)增产 3.0%~17.9% 和 12.2%~36.4%, 经稻-菜轮作后, 第二季(C3)的水稻产量比第一季(C1)水稻增加了 820~1 240 kg·hm⁻². 与 F 处理相比, 稻-菜轮作下连续秸秆覆盖与化肥减量配施的土壤 pH 提高了 0.06~0.55 个单位, 特别是秸秆全量还田(AS)与 70%~80% 化肥(F)配施处理(70%~80% F + AS)对土壤 pH 的改善效果最佳, 同时 80% F + AS 处理的土壤有机质最高, 达到了 41.01 g·kg⁻¹. 对土壤有效养分含量而言, 80% F + AS 处理的土壤碱解氮(110~178 mg·kg⁻¹) 和有效磷(31.3~64.0 mg·kg⁻¹) 含量最高, 但过多的秸秆还田量反而不利于土壤有效磷累积. 秸秆还田与化肥减量配施提高了土壤酶活性, 其中 80% F + AS 和 70% F + AS 处理对脲酶活性提高效果较为显著; 80% F + AS 处理的过氧化氢酶在前两季度下活性均最高; 随着耕种时间的增加, 特别是 C3 季度下, 70% F + AS 和 80% F + AS 处理的磷酸酶活性较 F 处理显著提高了 45.2% 和 48.2%. 因此, 西南丘陵山区紫色土在稻-菜轮作下, 70%~80% F + AS 处理即秸秆全量覆盖还田与化肥减量 20%~30% 的配施方式是该地区的最优施肥方式.

关键词: 秸秆还田; 减量施肥; 酶活性; 土壤养分; 轮作

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4446-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605024

Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils

HUANG Rong, GAO Ming*, WAN Yi-lin, TIAN Dong, TAO Rui, WANG Fang-li

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The effects of straw returning combined the reducing application of chemical fertilizer for crop yield, soil nutrients and enzyme activity were studied in a typical southwestern hilly area of China in a rice-vegetable (*Brassica juncea* var. *gemmifera* Lin.) cropping system. The purple soil was selected as the target type of soil, and the Pioneer Town, Jiangjin District, Chongqing, China was selected as the typical southwestern hilly area during 2013 and 2014. Scientific basis based on the optimized fertilization strategy and the recyclable utilization of straw was provided through a field in-situ experiment in this study. There were five treatments in the field experiment: F (conventional fertilizer), 90% F + AS (100% straw with 90% conventional fertilizer), 80% F + AS (100% straw with 80% conventional fertilizer), 70% F + AS (100% straw with 70% conventional fertilizer), 50% F + DS (200% straw with 50% conventional fertilizer), and the 100% straw was 7 500 kg·hm⁻². The results showed that the yields of rice and vegetable were all increased in straw with reduced fertilizer treatments (3.0%-17.9% in rice yield and 12.2%-36.4% in vegetable yield) compared with conventional fertilizer (F) treatment. Moreover, the yield of rice in the second season was also increased by 820-1 240 kg·hm⁻². Soil pH values in straw with reduced fertilizer treatments raised by 0.06-0.55 compared with F treatment, especially in straw with 70% and 80% of conventional fertilizer dosage which increased by 6.74-6.88 and 6.52-6.84, respectively. The highest content of soil organic matter was 41.01 g·kg⁻¹ in straw with 80% of conventional fertilizer treatment. For the aspect of soil available nutrients, straw with 80% of conventional fertilizer treatment increased 110-178 mg·kg⁻¹ content of soil available nitrogen and 31.3-64.0 mg·kg⁻¹ content of soil available phosphorus. However, the excessive application of straw had negative effect on the accumulation of soil available phosphorus. In the same cultivation period, the contents of soil urease increased significantly in straw with 70% and 80% of conventional fertilizer treatments, which increased by 13.6%-76.4% and 20.1%-75.0% compared with F treatment. The contents of soil catalase in straw with reduced fertilizer treatments were significantly higher than F treatment; in first two seasons, soil catalase contents increased by 0.37 and 0.31 mL·(h·g)⁻¹ relative to F treatment in straw with reduced fertilizer treatment (80% of conventional fertilizer). With the increasing time of planting, the soil phosphatase content in the third season was higher than those in

收稿日期: 2016-05-04; 修订日期: 2016-06-06

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B18); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016E160)

作者简介: 黄容(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 277840241@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

first two seasons. Straw with 70% and 80% of fertilizer treatments increased the activity of soil phosphatase by 45.2% and 48.2% compared with F treatment. It was concluded that straw application with 70% or 80% dosage of conventional fertilizer could benefit the rice-vegetable rotation in the southwest hilly area of China.

Key words: straw returning; reducing fertilizer; soil enzyme activity; soil nutrients; rotation

作物秸秆是农作物的重要组成部分,占作物生物产量的一半以上,主要包括各种禾本科和豆科类作物秸秆,是一类极丰富的能被直接利用的可再生纤维素资源。作为一种低廉的有机肥源,作物秸秆含有大量 N、P、K 等营养元素和微量元素,以及丰富的有机质^[1,2]。肥料作为农作物发育生长养分的重要营养来源,对作物增产有重要的作用,但是化肥的过量和不合理的施用,致使一些地区相继出现了土壤退化现象,包括土壤酸化,土壤养分贫瘠化等^[3]。我国秸秆资源丰富,据统计我国作物秸秆的年产量约 7 亿 t,相当于 350 万 t 氮肥、800 万 t 钾肥、80 万 t 磷肥,但是我国的秸秆利用率低,还田率低于 50%^[4,5]。因此,秸秆作为重要的有机肥源之一,是新兴的生物质能源,通过合理的开发利用,不仅可以解决环境污染和资源浪费问题,还可以缓解化肥过量施用带来的土壤退化问题^[6~8]。

秸秆还田已成为我国农作物肥料结构变化的关键性技术措施之一,不仅可以提高土壤的养分含量,还可以改善土壤理化性质^[7]。相关研究表明,秸秆不同的还田量对土壤肥力效应不同,在黄土高原有灌溉条件的地区,玉米秸秆还田量 $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施 $138\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮量,能有效提高土壤肥力,同时显著增加了冬小麦产量^[9]。在黄淮海地区,深耕或者深松的耕作方式结合秸秆还田不仅提高了农田水分的利用率,而且使周年作物增产 18.0%~19.3%。在长期不施用钾肥的条件下,秸秆还田技术配合氮肥和磷肥施用,可以显著提高土壤速效钾含量^[10,11]。长期黑麦草秸秆还田,18a 后可增加 12%~30% 土壤有机碳含量^[12],我国黑龙江农村在秸秆还田 13 a 后,有机质增加了 0.2%,可见在一定范围内,随着秸秆还田量和时间的增加,可以有效提高土壤有机质含量^[13,14],增加作物产量。除提高土壤肥力,增加作物产量外,秸秆还田还能够提高土壤酶活性。胡乃娟等^[15]研究了不同秸秆还田量对稻麦轮作系统中土壤酶活性的影响,表明秸秆还田处理相对于秸秆不还田处理能显著提高土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性,特别是连续两季 25% 秸秆还田量对酶活性的提高效果最为显著。秸秆还田配合土壤深松(耕)处理可以使土壤酶活性显著提高 25%~46%,最终提高了作物产量^[16];而免耕条件

下,秸秆还田同样能提高土壤酶活性,蔡丽君等^[17]研究表明土壤酶活性在 60% 秸秆还田量时达到较高值。此外秸秆由于 C/N 含量较高,难被微生物降解,需要配施一定的氮、磷肥或微生物制剂等后还田,才能有效提高土壤中微生物数量,从而增强土壤酶活性^[18,19]。

近年来学者们对秸秆还田方面的研究主要集中在东北和华北平原等北方地区,对南方地区虽然有所研究,但主要集中的秸秆不同还田量、配施不同比例的肥料和耕作方式等方面^[1,20~22],而对水稻-菜轮作下,秸秆还田与化肥减量配施对土壤养分、酶活性等研究较少,特别是对西南丘陵山区紫色土的研究鲜见报道。因此,本研究于 2013 年 4 月至 2014 年 11 月在重庆市江津区先锋镇,布置田间试验,分析了水稻-菜轮作下,秸秆还田与化肥减量配施对土壤肥力、酶活性及作物产量的影响,明确维持和提高水稻-菜轮作系统生产力的最佳秸秆还田量与施肥方式;并探讨秸秆还田与化肥减量配施对土壤肥力的效应及原因,以期对稻-菜轮作系统中养分资源优化管理的施肥方式提供科学依据,实现农业秸秆的循环利用。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 4 月至 2014 年 11 月在重庆市江津区先锋镇仙池坝建成“重庆市现代果树生态示范园”(106°17'51"E,29°13'22"N)进行田间试验。重庆市江津区先锋镇是中国三大花椒之乡之一,地处江津城郊结合部,是江津城区后庭核心。该区属亚热带季风气候,光照充足,气候温和,雨量充沛,日照时数年均 1 207.9 h,常年平均气温 18.2℃,年平均降雨量为 1 034.7 mm,适合蔬菜种植,作物品种以蔬菜、脐橙、花椒为主。试验区土壤为紫色土,土壤基本的理化性质: pH 值为 6.50,容重为 $1.41\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质含量为 $20.1\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量分别为 0.859、0.342、11.6 $\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 83.6、21.2、50.0 $\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理:① F,常规施用化肥;② 90% F + AS,秸秆全量还田与 90% 化肥配施;

- ③ 80% F + AS, 秸秆全量还田与 80% 化肥配施;
 ④ 70% F + AS, 秸秆全量还田与 70% 化肥配施;
 ⑤ 50% F + DS, 2 倍秸秆量还田与 50% 化肥配施.
 秸秆全量还田为水稻秸秆全量还田, 还田量为 7 500

kg·hm⁻². 试验小区面积为 12 m² (3 m × 4 m), 3 次重复, 随机区组排列. 小区间用高 30 cm、宽 30 cm 的土埂隔开, 以防小区间窜水窜肥, 整个试验区外围设保护行 (如图 1).

保护行					
保护行	F	80%F + AS	90%F + AS	50%F + DS	70%F + AS
	50%F + DS	70%F + AS	F	90%F + AS	80%F + AS
	80%F + As	90%F + As	50%F + Ds	70%F + As	F
保护行					

图 1 试验设计分布

Fig. 1 Test design pattern

采用一年两熟, 水稻-儿菜轮作制度, 供试水稻为 JJ 优 868, 儿菜为早娃一号. 水稻种植密度为 1.65×10^5 株·hm⁻², 儿菜种植密度为 4.00×10^4 株·hm⁻². 水稻秸秆粉碎后 (约 10 cm) 于施基肥前 3 d 翻压、平整. 2013 年 5 月种植水稻 (C1), 每个小区种植 9 × 11 穴, 每穴种植水稻苗 2 株; 2013 年 10 月种植儿菜 (C2), 每个小区种植 6 × 8 穴, 每穴种植儿菜苗 1 株; 2014 年 5 月种植水稻 (C3), 每个小区种植 9 × 11 穴, 每穴种植水稻苗 2 株.

试验用肥料为氮肥 (含 N 46% 的尿素), 磷肥 (含 P₂O₅ 12% 的过磷酸钙), 钾肥 (含 K₂O 60% 的氯化钾). 水稻常规施肥量为 N 112 kg·hm⁻², P₂O₅ 49 kg·hm⁻², K₂O 52 kg·hm⁻²; 儿菜常规施肥量为 N 252 kg·hm⁻², P₂O₅ 69 kg·hm⁻², K₂O 117 kg·hm⁻². 水稻施肥方式: 氮肥分 3 次施用, 基肥: 蘖肥: 穗肥 = 2: 1: 1; 钾肥分 2 次施用, 基肥: 穗肥 = 2: 1; 磷肥在水稻移栽前作基肥一次性施入. 儿菜施肥方式: 氮肥分 2 次施用, 基肥: 追肥 = 4: 6; 钾肥和磷肥在儿菜种植前做基肥一次性施入. 试验期间灌水方式为浇灌, 其它栽培管理措施同当地大田.

生产管理: 田间生产管理均按当地实际生产措施进行, 并适时防治病虫害.

1.3 测定项目及方法

采集每一季作物收获后耕作层的土壤样品. 采样点的布设是根据自然环境状况, 种植面积, 并兼顾布点均匀性、代表性和科学性的原则, 采用梅花型布点方式, 一般每个小区内设 1 组 (3 ~ 5 个) 平行样点, 再将多个平行样点混合成一个均匀的土样, 采用四分法弃去至各混合土样保留 1 kg 左右. 取四分之一的土样放冰箱 4℃ 下保存, 用以测定土壤酶活性;

其余土样经风干磨碎后, 过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用.

1.3.1 土壤养分含量测定

土壤 pH 值: 采用水浸提电位法测定, 用无 CO₂ 去离子水调节土水比为 5: 1, 搅拌 1 min, 静置 30 min 后, 用 DMP-2mV/pH 计测定; 土壤有机质: 重铬酸钾容量法; 土壤碱解氮: 碱解扩散法测定; 土壤速效钾: NH₄Ac 浸提-火焰光度计法测定; 土壤有效磷: 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定.

1.3.2 土壤酶活性测定

脲酶活性: 苯酚钠-次氯酸钠比色法, 以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的毫克数 (mg) 表示土壤脲酶活性; 过氧化氢酶活性: 高锰酸钾容量法, 以 1 g 土壤 1 h 内消耗的 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 体积数 (mL) 表示土壤过氧化氢酶活性; 磷酸酶活性: 磷酸苯二钠比色法, 以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的毫克数 (mg) 表示磷酸酶活性;

具体测定详细步骤参见文献 [23, 24].

以上比色法所用仪器为 TU-1901 双光束紫外可见光光度计和 721-P 可见分光光度计.

1.4 数据处理及分析

作物增产率% = 100 ×

$\frac{\text{秸秆还田与化肥减量配施的产量} - \text{常规施肥的产量}}{\text{常规施肥的产量}}$

(1)

土壤脲酶活性 [mg·(g·24 h)⁻¹] =

$(M - M_0 - M_1) \times V \times n / m$ (2)

式中, M 为样品吸光值由标准曲线求得的 NH₃-N 毫克数, mg; M_0 为无土对照吸光值由标准曲线求得的

$\text{NH}_3\text{-N}$ 毫克数, mg; M_1 为无基质对照吸光值由标准曲线求得的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 毫克数, mg; V 为显色液体积, mL; n 为分取倍数, 浸出液体积/吸取滤液体积; m 为烘干土重, g.

$$\text{土壤过氧化氢酶活性} [\text{mL} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}] = \frac{(V_0 - V) \times T/m}{(3)}$$

式中, V_0 为空白样剩余过氧化氢滴定体积, mL; V 为土样剩余过氧化氢滴定体积, mL; m 为烘干土重, g; T 为高锰酸钾滴定度的矫正值 $T = 0.0205 / 0.02 = 1.026$.

$$\text{土壤磷酸酶活性} [\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}] = \frac{(M - M_0 - M_1) \times V \times n/m}{(4)}$$

式中, M 为样品吸光值由标准曲线求得的酚毫克数, mg; M_0 为无土对照吸光值由标准曲线求得的酚毫克数, mg; M_1 为无基质对照吸光值由标准曲线求得的酚毫克数, mg; V 为显色液体积; n 为分取倍数, 浸出液体积/吸取滤液体积; m 表示烘干土重, g.

数据处理采用 Excel 2003、SPSS 18.0 等统计软件, 对数据进行方差分析 (LSD 法).

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与化肥减量配施对作物产量的影响

与常规施肥 (F) 相比, 秸秆还田与化肥减量配施能提高水稻和儿菜的产量. 从表 1 可以看出, 第一季水稻收获后 (C1), 各处理的产量表现为 $90\% + \text{AS} > 50\% \text{F} + \text{DS} > 80\% \text{F} + \text{AS} > 70\% \text{F} + \text{AS} > \text{F}$, 其中 $90\% + \text{AS}$ 和 $50\% \text{F} + \text{DS}$ 处理的第一季水稻增产效果最佳, 分别较 F 处理提高了 16.2% 和 15.4%, 但各处理间差异不显著. 在儿菜收获后 (C2), $80\% \text{F} + \text{AS}$ 、 $70\% \text{F} + \text{AS}$ 和 $50\% \text{F} + \text{DS}$ 处理产量分别比 F 处理提高了 1 670、2 000、1 420 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 经轮作后, 第二季水稻 (C3) 较第一季 (C1) 增产 820 ~ 1 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 $90\% + \text{AS}$ 和 $50\% \text{F} + \text{DS}$ 处理的第二季水稻的产量仍是较高的, 显著提高了 18.0% 和 17.3%, 可见轮作条件下, 秸秆全量还田配施 90% 化肥和两倍秸秆还田配施 50% 化肥对水稻的增产效果优于其他减量施肥处理.

2.2 秸秆还田与化肥减量配施对土壤 pH 值和有机质的影响

秸秆还田与化肥减量配施能有效提高土壤 pH 值, 如图 2 所示, 在整个试验过程中, $80\% \text{F} + \text{AS}$ 、 $70\% \text{F} + \text{AS}$ 和 $50\% + \text{DS}$ 处理的土壤 pH 值均较高, 与常规施肥 F 处理相比均达到显著水平 (P

表 1 秸秆还田与化肥减量配施对作物产量的影响¹⁾

作物	处理	产量 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	增产量 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	增产率 /%
C1	F	6 360 ± 543a	— ²⁾	—
	90% F + AS	7 390 ± 453a	1 030 ± 65	16.2 ± 1.2
	80% F + AS	6 660 ± 765a	300 ± 22	4.7 ± 0.5
	70% F + AS	6 580 ± 482a	220 ± 31	3.5 ± 0.1
	50% F + DS	7 340 ± 863a	980 ± 75	15.4 ± 1.8
C2	F	5 500 ± 342a	—	—
	90% F + AS	6 170 ± 582ab	670 ± 89	12.2 ± 0.9
	80% F + AS	7 170 ± 821b	1 670 ± 103	30.4 ± 2.3
	70% F + AS	7 500 ± 632b	2 000 ± 148	36.4 ± 4.1
	50% F + DS	6 920 ± 234b	1 420 ± 97	25.8 ± 3.1
C3	F	7 180 ± 357a	—	—
	90% F + AS	8 470 ± 517b	1 290 ± 845	18.0 ± 1.2
	80% F + AS	7 900 ± 389ab	720 ± 48	10.0 ± 0.6
	70% F + AS	7 400 ± 681ab	220 ± 23	3.1 ± 0.2
	50% F + DS	8 420 ± 324b	1 240 ± 87	17.3 ± 1.3

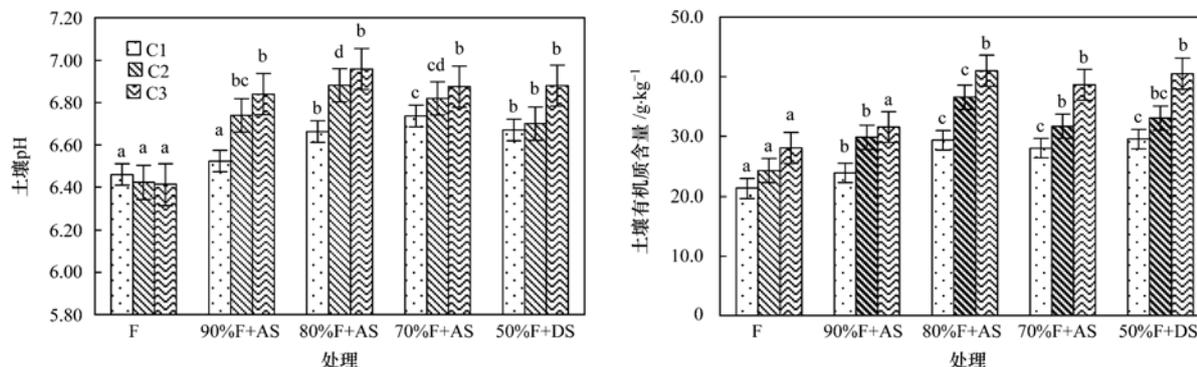
1) 不同小写字母表示同一季度下各处理间差异显著性 ($P < 0.05$), 下同; 2) “—”表示文章中没有相关数据

< 0.05); 随着种植时间的增加, 秸秆还田处理的土壤 pH 值均提高, 而 F 处理的有所下降, 可见长期施用化肥增加土壤酸化程度. 从图 2 还可以看出, 不同耕作季度下, 不同处理对土壤 pH 值的影响存在差异; 在 C1 季度下, 除 $90\% \text{F} + \text{AS}$ 处理较 F 处理差异不显著外其他秸秆还田处理均显著提高了 0.20 ~ 0.28 个单位 ($P < 0.05$), 其中 $70\% \text{F} + \text{AS}$ 处理的效果最佳; C2 和 C3 季度下, $80\% \text{F} + \text{AS}$ 处理的 pH 值最高, 分别为 6.88 和 6.96, 可见秸秆还田与化肥减量配合施用对稻-菜轮作系统的土壤 pH 有一定的改善作用, 其中 $70\% \text{F} + \text{AS}$ 和 $80\% \text{F} + \text{AS}$ 处理的效果较佳.

土壤有机质既是植物矿质营养和有机营养的源泉, 又是土壤中异养型生物的能量物质, 同时也是形成土壤结构的重要因素, 对肥力因素、水肥气热影响最大, 是土壤肥力重要的物质基础. 由图 2 可知, C1 季度下, 与 F 处理相比, 秸秆还田处理的土壤有机质均显著提高了 2.55 ~ 8.23 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$), 其中 $80\% \text{F} + \text{AS}$ 处理的效果最佳; C2 季度下, 各处理的土壤有机质含量表现为 $80\% \text{F} + \text{AS} > 50\% \text{F} + \text{DS} > 70\% \text{F} + \text{AS} > 90\% \text{F} + \text{AS} > \text{F}$, $80\% \text{F} + \text{AS}$ 处理较 F 处理显著提高了 50.8%; 经轮作后即 C3 季度下, 各处理的土壤有机质较前两季均提高, 且除 $90\% \text{F} + \text{AS}$ 处理与 F 处理不存在显著差异外其他秸秆还田处理均显著提高了 37.9% ~ 46.2%, 其中

80% F + AS 处理的土壤有机质最高,为 $41.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为 50% F + DS 处理;可见轮作可以有

效提高土壤有机质含量,以 80% F + AS 处理效果最佳,其次为 50% F + DS 处理.



不同小写字母表示同一季度下各处理间差异显著性 ($P < 0.05$)

图 2 不同处理对土壤 pH、有机质的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil pH and organic matter

2.3 秸秆还田与化肥减量配施对土壤有效养分的影响

土壤速效养分是作物吸收利用的有效养分形态,是作物高产的保证.从表 2 可以看出,在整个试验过程中,不同耕作季度下的土壤有效养分含量变化趋势较一致,表现为 $C3 > C2 > C1$,可见轮作可以有效地提高土壤有效养分的含量.对土壤碱解氮而言,秸秆还田处理较常规施肥 F 处理显著提高了 $18.7 \sim 51.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$),其中 80% F + AS 处理即秸秆全量还田与 80% 化肥减量配施处理的土壤碱解氮含量相对较高,为 $110 \sim 178 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为 50% F + DS 处理.每一季度作物收获后,各处理的土壤有效磷含量随着化肥施用量的减少,呈先增加后减少的趋势,峰值均出现在秸秆全量还田配施 80% 化肥量的处理 (80% F + AS 处理),达到了 $31.3 \sim 64.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 F 处理显著提高了 $24.8\% \sim 36.5\%$ ($P < 0.05$),而 50% F + DS 和 90% F + AS 处理的土壤有效磷的增幅较小,未超过 10%,说明过多的秸秆还田量反而会不利于土壤有效磷累积.对于土壤速效钾而言,C1 季度下,80% F + AS 处理的速效钾含量为 $83.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为 90% F + AS 处理;随着种植时间的增加,C2 季度下,80% F + AS 和 70% F + AS 处理速效钾含量较高,是 F 处理的 2 倍多;整个试验结束后,各处理的速效钾含量表现为 $70\% \text{ F} + \text{AS} > 80\% \text{ F} + \text{AS} > 90\% \text{ F} + \text{AS} > 50\% \text{ F} + \text{DS} > \text{F}$,其中 70% F + AS 处理比 F 处理显著提高了 45.4% ($P < 0.05$),而 50% F + DS 处理仅提高了 4.6% .

总体而言,秸秆还田与化肥减量配施能够有效

增加耕层土壤的有效养分,随着种植时间的增加,有效养分呈增加趋势.对于同一耕作期,土壤有效养分随着减量施肥量的变化呈现先增加后降低再增加的趋势,但整体都高于常规施肥处理.

表 2 不同处理对土壤碱解氮、有效磷和速效钾的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil alkalytic nitrogen, available phosphorus and available potassium

处理	土壤碱解氮 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤有效磷 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤速效钾 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
F	$86.3 \pm 8.2 \text{ a}$	$23.2 \pm 1.2 \text{ a}$	$50.0 \pm 4.2 \text{ a}$
90% F + AS	$105 \pm 12.2 \text{ b}$	$24.3 \pm 3.5 \text{ ab}$	$77.8 \pm 8.5 \text{ d}$
C1 80% F + AS	$110 \pm 10.5 \text{ c}$	$31.3 \pm 5.1 \text{ b}$	$83.3 \pm 9.1 \text{ e}$
70% F + AS	$111 \pm 11.2 \text{ c}$	$27.0 \pm 1.5 \text{ a}$	$71.0 \pm 6.7 \text{ c}$
50% F + DS	$110 \pm 9.5 \text{ c}$	$23.4 \pm 2.0 \text{ a}$	$63.0 \pm 8.1 \text{ d}$
F	$97.2 \pm 5.6 \text{ a}$	$37.3 \pm 4.0 \text{ a}$	$57.1 \pm 6.0 \text{ a}$
90% F + AS	$135 \pm 12.4 \text{ b}$	$47.1 \pm 5.2 \text{ b}$	$106 \pm 10.5 \text{ b}$
C2 80% F + AS	$149 \pm 11.5 \text{ c}$	$50.9 \pm 6.1 \text{ b}$	$119 \pm 9.5 \text{ b}$
70% F + AS	$143 \pm 17.2 \text{ bc}$	$46.9 \pm 3.8 \text{ b}$	$118 \pm 8.2 \text{ b}$
50% F + DS	$146 \pm 10.5 \text{ c}$	$38.4 \pm 2.9 \text{ a}$	$88.5 \pm 9.7 \text{ ab}$
F	$113 \pm 10.2 \text{ a}$	$51.3 \pm 4.5 \text{ a}$	$108 \pm 5.6 \text{ a}$
90% F + AS	$146 \pm 18.4 \text{ b}$	$52.8 \pm 4.5 \text{ ab}$	$131 \pm 11.2 \text{ b}$
C3 80% F + AS	$178 \pm 21.0 \text{ d}$	$64.0 \pm 7.1 \text{ c}$	$143 \pm 16.2 \text{ c}$
70% F + AS	$153 \pm 13.5 \text{ c}$	$56.7 \pm 6.5 \text{ b}$	$157 \pm 14.1 \text{ d}$
50% F + DS	$158 \pm 12.6 \text{ c}$	$55.5 \pm 5.6 \text{ ab}$	$113 \pm 10.2 \text{ a}$

2.4 秸秆还田与化肥减量配施对土壤酶活性的影响

从表 3 可以看出,施肥和秸秆处理均对土壤脲酶活性有提升作用.从不同的耕作季节来看,不同处理的土壤脲酶活性变化趋势较为相近,均呈现先升高后降低的趋势.随着耕种时间的延长,土壤脲酶活性有提升的趋势,特别是 C3 季度下的各处理的酶活性高于前两季度,可见连续秸秆覆盖可以有效提高土壤脲酶活性.同一耕作季度下,与常规施

肥 F 处理相比, 秸秆覆盖处理的土壤脲酶活性均提高, 其中 80% F + AS 处理和 70% F + AS 处理对脲酶活性提高效果较为显著, 分别较 F 处理显著提高了 13.6% ~ 76.4% 和 20.1% ~ 75.0% ($P < 0.05$).

对土壤过氧化氢酶而言, 同一耕作季度下, 过氧化氢酶活性随着减量施肥呈现先增加后保持平衡的趋势, 且秸秆覆盖处理的土壤过氧化氢酶活性高于常规施肥 F 处理, 其中 C1 和 C2 季度下, 80% F + AS 处理的过氧化氢酶活性均最高, 较 F 处理分别显著提高了 $0.37 \text{ mL} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $0.31 \text{ mL} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ ($P < 0.05$). 从表 3 还可以看出, 随着种植时间的增加, 各处理的土壤酸性磷酸酶活性变化趋势较为一致, 均随着耕种时间的增加而提升, 特别是 C3 季度下的各处理的酶活性高于前两季度, 可见连续秸秆覆盖可以有效提高土壤酸性磷酸酶活性. 同一季度下, 土壤酸性磷酸酶活性随着化肥施用量的减少, 呈先增加后减少的趋势; 其中 C1 季度下, 70% F + AS 处理的磷酸酶活性最高, 较 F 处理显著提高了 62.7% ($P < 0.05$), C2 季度下, 50% F + DS 处理的磷酸酶活性最高, 较 F 处理提高了 60.0%, C3 季度下, 70% F + AS 和 80% F + AS 处理的磷酸酶活性较高, 较 F 处理分别显著提高了 45.2% 和 48.2% ($P < 0.05$).

表 3 不同处理对土壤酶活性的影响

作物	处理	脲酶 $/\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$	过氧化氢酶 $/\text{mL} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$	磷酸酶 $/\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$
C1	F	$0.37 \pm 0.01 \text{ a}$	$3.78 \pm 0.21 \text{ a}$	$0.52 \pm 0.07 \text{ a}$
	90% F + AS	$0.44 \pm 0.05 \text{ b}$	$4.13 \pm 0.12 \text{ bc}$	$0.74 \pm 0.04 \text{ b}$
	80% F + AS	$0.42 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.15 \pm 0.54 \text{ c}$	$0.77 \pm 0.04 \text{ bc}$
	70% F + AS	$0.44 \pm 0.03 \text{ b}$	$4.11 \pm 0.21 \text{ b}$	$0.85 \pm 0.04 \text{ d}$
	50% F + DS	$0.41 \pm 0.06 \text{ ab}$	$4.09 \pm 0.64 \text{ b}$	$0.79 \pm 0.02 \text{ c}$
C2	F	$0.40 \pm 0.01 \text{ a}$	$3.93 \pm 0.38 \text{ a}$	$0.66 \pm 0.06 \text{ a}$
	90% F + AS	$0.55 \pm 0.04 \text{ b}$	$4.17 \pm 0.28 \text{ d}$	$0.85 \pm 0.04 \text{ b}$
	80% F + AS	$0.55 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.24 \pm 0.57 \text{ e}$	$0.87 \pm 0.07 \text{ b}$
	70% F + AS	$0.70 \pm 0.08 \text{ c}$	$4.19 \pm 0.10 \text{ c}$	$0.93 \pm 0.10 \text{ b}$
	50% F + DS	$0.54 \pm 0.02 \text{ b}$	$4.13 \pm 0.74 \text{ b}$	$1.06 \pm 0.11 \text{ c}$
C3	F	$1.30 \pm 0.11 \text{ a}$	$4.39 \pm 0.64 \text{ a}$	$1.52 \pm 0.17 \text{ a}$
	90% F + AS	$1.65 \pm 0.65 \text{ ab}$	$4.42 \pm 0.24 \text{ c}$	$2.04 \pm 0.09 \text{ bc}$
	80% F + AS	$2.29 \pm 0.12 \text{ b}$	$4.40 \pm 0.57 \text{ ab}$	$2.25 \pm 0.14 \text{ c}$
	70% F + AS	$2.01 \pm 0.18 \text{ b}$	$4.42 \pm 0.61 \text{ bc}$	$2.21 \pm 0.37 \text{ c}$
	50% F + DS	$1.79 \pm 0.21 \text{ ab}$	$4.40 \pm 0.34 \text{ ab}$	$1.81 \pm 0.07 \text{ b}$

3 讨论

3.1 秸秆还田与化肥减量配施对作物产量的影响

作物的产量是农业管理水平与土壤生产力的综合反映, 也是农业持续发展的重要评价指标. 大量研究发现, 合理的秸秆还田可以提高作物产

量^[3,9,25], 增加作物中的总干物质的累积量^[26], 杨滨娟等研究表明^[27], 秸秆还田配施不同比例的化肥可以提高水稻干物质的累积速率, 群体生物量, 提高水稻的产量. 本研究发现秸秆还田后, 适量的减量施肥仍可以提高作物产量, 其中 90% F + AS 处理对水稻的增产效果最佳, 70% F + AS 处理对儿菜的增产效果最佳, 且儿菜的增产效应远高于水稻; 这是由于秸秆还田一方面向微生物提供碳源, 提高微生物活性, 促进土壤供肥能力, 另一方面还能够缓和冬季地温和土壤蓄水保墒效果^[28], 因此儿菜在冬季种植时仍获得高产的效应, 郑成岩等研究也表明^[29], 秸秆还田可以改善耕层土壤水分条件和地温, 提高作物的干物质累积量, 从而达到增产的效果. 同时, 随着秸秆还田时限的延长, 作物增产效果更显著, 表明秸秆还田对作物产量的影响是一个长期的过程.

3.2 秸秆还田与化肥减量配施对土壤 pH 值及养分的影响

作物生长需要适宜的土壤酸碱度. 土壤 pH 值决定了土壤酸碱状况, 是土壤重要的化学性质, 影响着土壤生态环境. 有研究表明, 秸秆还田可以有效改善土壤的酸性, 一方面因为秸秆还田可以提高土壤有机质积累, 有机质在分解过程中产生 CO_2 和大量有机酸, 降低了秸秆还田后的盐碱土壤 pH 值^[30]; 另一方面, 王允青等^[31]对秸秆不同还田方式作物秸秆腐解特征研究提出, 秸秆浸提液呈弱碱性 ($\text{pH} > 8$), 对酸化土壤有一定的改善作用. 本试验研究表明, 秸秆(粉碎)还田与化肥减量配施处理对酸化土壤仍有明显的改善作用, 与前人的研究结果相类似^[32~34], 这主要是因为秸秆配合适量的化肥, 可以增加土壤有机质的累积量, 从而使有机质在分解过程中产生酸性物质, 虽然降低了土壤的 pH 值, 但是秸秆还田后浸提液呈弱碱性, 最终使土壤 pH 值提升了近 0.5 个单位. 土壤有机质是评价土壤肥力的重要指标, 作物秸秆中含有丰富的有机成分和营养元素, 还田后, 秸秆周围会有大量的微生物进行繁殖, 形成微生物的活动层, 促进了对秸秆有机态养分的分解释放, 从而增加有机质含量^[35,36]. 前人从秸秆还田方式、还田量、还田时间、秸秆还田与化肥配合施用等方面对土壤有机质进行了研究^[14,27,37,38], 但关于秸秆还田与化肥减量配施对土壤有机质的影响的研究少有报道, 本研究表明, 80% F + AS 处理对土壤有机质的含量的提高效果最佳, 因为在微生物分解秸秆的过程中添加适量的氮肥, 可以为微生物提高氮源, 调节适宜土壤微生物生长

的 C/N,促进土壤微生物活性,从而加快了微生物对秸秆中有机态养分的分解释放,提高了土壤有机质含量^[39~41],但秸秆还田量或者施氮量过高,会影响土壤 C/N,降低微生物数量和活性,最终降低土壤有机质的增加率^[1].

秸秆中富含氮、磷、钾等营养元素,具有培肥土壤的重要作用. 闫洪奎等^[42]研究表明,长期 5 年秸秆还田和有机肥配施处理可以增加土壤有效氮和速效磷含量,但速效钾含量随着种植年限的增加呈下降趋势. 但另有研究认为,秸秆还田能显著提升土壤速效氮、速效磷和速效钾含量^[43]. 同时,路文涛等^[44]、汤文光等^[45]的研究结果显示连续的秸秆还田能显著提高土壤速效氮、速效磷含量,并能有效减缓土壤速效钾含量的降低趋势. 本试验中秸秆还田与化肥减量配施处理较常规施肥处理提高了土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量,且土壤速效养分随着减量施肥水平的提高呈先增加后降低的趋势,这与汪军等^[46]的研究结果相类似. 其中秸秆全量还田配施 80% 的化肥处理对改善土壤速效养分含量的效果最佳,但双倍秸秆还田与 50% 化肥配施处理对土壤速效磷、速效钾含量的提升效果不显著,而对土壤碱解氮的含量有显著的提升效果. 这是因为秸秆中碳素资源丰富,C/N 比高的秸秆还田后会激发土壤氮的矿化,增加土壤碱解氮的含量,且秸秆还田配合无机氮肥能有效提高土壤氮素供应能力^[47],因此秸秆还田处理的土壤碱解氮含量均显著提高;同时由于双倍的秸秆还田量(DS)配施 50% 化肥,较全量秸秆还田量(AS)提供了更加充足的碳源,增强了微生物的活性,促进了土壤磷酸酶活性(表 3),增加了土壤微生物量磷含量,但是由于该处理施用的磷肥较少,靠作物残留根茬归还土壤磷,土壤有效磷会趋于耗竭^[48],因此 50% F + DS 处理的土壤速效磷含量较低.

3.3 秸秆还田与化肥减量配施对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤中植物、动物、微生物活动的产物,参与了许多重要的生物化学过程,其活性的高低可以用来评价土壤肥力的重要指标之一. 有研究表明作物秸秆可以提高土壤中脱氢酶、脲酶及过氧化氢酶等酶活性^[49],但不同作物秸秆及还田的效应存在一定差异. 本试验研究中,随着秸秆还田的时限增长,土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶均得到提高,并且秸秆还田配合减量施肥对于酶活性的提升效果高于常规施肥 F 处理(即秸秆不还田处理),特别是 70% ~ 80% F + AS(全量秸秆还田)对于土

壤酶活性的提升效果最佳. 通过土壤酶活性与土壤养分含量相关性分析发现(表 4),同一耕作季,在秸秆还田条件下减量施肥对于土壤过氧化氢酶活性的提升有着显著的促进作用,而对脲酶和酸性磷酸酶活性的提升效果不显著. 土壤有机质、pH 和速效养分均对脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性的相关性均达到极显著正相关,这与王丽娜等的研究结果相似^[50].

土壤脲酶参与土壤有机氮素的分解转化,为植物和微生物生长提供氮源^[21]. 有研究表明,施入土壤中的尿素只能在脲酶的参与下才能水解,脲酶的酶促反应产物是植物氮源之一,其活性可以用来表征土壤氮素供应能力^[51]. 与常规施肥处理(无秸秆还田)相比,本研究中秸秆还田配施化肥处理的土壤脲酶活性均提高,一方面是因为秸秆还田后,为土壤微生物生长提供了有效碳源,提高了土壤微生物的活性,从而增加了包括土壤脲酶在内的分泌物的数量;另一方面,秸秆含碳量高,激发了微生物对秸秆的分解,提高脲酶活性^[47]. 同时本试验中双倍秸秆还田量的脲酶活性均低于全量秸秆还田,这与胡乃娟等对稻麦轮作系统下不同秸秆还田量对脲酶活性的影响研究结果相类似^[15],但另有研究指出,秸秆还田处理下,脲酶活性随着还田量的增加呈上升趋势,这可能与不同的土壤质地、种植制度以及气候条件相关,也有可能是因为双倍秸秆还田条件下的氮肥施用量较低,比其他全量秸秆还田处理的氮源少,因此 50% F + DS 处理的土壤脲酶活性低.

土壤磷酸酶是反映土壤有机磷转化能力的指标之一,其活性的高低直接影响土壤有机磷的分解转化能力以及土壤磷素状况. 有研究表明,长期秸秆还田、无机肥与有机肥混合施用可显著提高土壤磷酸酶的活性^[52,51]. 土壤 pH 值极大影响土壤磷酸酶活性,本试验中供试紫色土偏酸性,因此主要以酸性磷酸酶的酶促反应为主. 秸秆还田的土壤磷酸酶活性高于秸秆不还田即常规施肥处理的磷酸酶活性,尤其是 80% F + AS 处理的磷酸酶活性较高,这是由于适量的秸秆还田配施一定量的氮、磷、钾肥,可以促进作物根系发育,改善了土壤理化性质,为微生物生长提供了适宜的环境,从而增加了包括土壤磷酸酶在内的分泌物数量^[50]. 本试验中土壤磷酸酶的活性变化趋势与速效磷的含量变化趋势相似,通过相关性分析(表 4),试验中土壤磷酸酶活性与速效磷含量达到极显著的正相关关系. 过氧化氢酶广泛存在于土壤和生物体内,其活性与土壤有机质含

量、微生物数量有关,可表征土壤腐殖化强度和有机质积累程度。钱海燕等研究发现^[54],秸秆还田配施一定比例的化肥可以提高土壤过氧化氢酶活性,但刘建国等^[55]对长期连作和秸秆还田下棉田土壤生物活性研究表明,短期连作和秸秆还田处理的土壤过氧化氢酶活性下降,而棉花连作与秸秆还田10年以上,过氧化氢酶活性达到较高水平。本试验条件下,稻菜轮作系统下的秸秆还田可以提高土壤过氧化氢酶活性,但并不是秸秆还田量越多越好,因为秸秆还田量过多会影响土壤C/N,从而影响微生物活性,最终减少了土壤酶等分泌物的产生^[17],所以本试验条件下,70%~80%F+AS处理对土壤过氧化氢酶活性的提高效果最佳。

表4 土壤酶活性与土壤理化性质的相关关系¹⁾

Table 4 Relationship between soil enzyme activity and soil chemical and physical properties

项目	脲酶	过氧化氢酶	磷酸酶
试验处理	0.121	0.249*	0.173
pH	0.442**	0.469**	0.459**
有机质	0.332**	0.449**	0.374**
碱解氮	0.670**	0.676**	0.703**
速效磷	0.744**	0.667**	0.767**
速效钾	0.722**	0.768**	0.747**

1) *表示5%显著水平,**表示1%极显著水平

4 结论

西南丘陵山区紫色土在稻-菜轮作下,连续秸秆覆盖与化肥减量配合使用,能提高水稻和蔬菜作物的产量、土壤肥力以及酶活性;其中70%~80%F+AS处理即秸秆全量覆盖与化肥减量20%~30%的还田方式是该地区稻-菜轮作模式的最优施肥方式,即水稻季施入氮肥(尿素)170.8~195.0 kg·hm⁻²、磷肥(过磷酸钙)189.2~215.8 kg·hm⁻²、钾肥(氯化钾)60.8~69.2 kg·hm⁻²、秸秆还田量7500 kg·hm⁻²,儿菜季施入氮肥(尿素)383.6~428.4 kg·hm⁻²、磷肥(过磷酸钙)266.9~305.1 kg·hm⁻²、钾肥(氯化钾)136.3~155.7 kg·hm⁻²、秸秆还田量7500 kg·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(1): 150-157.
Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(1): 150-157.
- [2] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, **21**(3): 242-247.
- [3] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, **22**(1): 65-70.
Ye W P, Xie X L, Wang K R, et al. Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, **22**(1): 65-70.
- [4] 杨滨娟, 钱海燕, 黄国勤, 等. 秸秆还田及其研究进展[J]. 农学学报, 2012, **2**(5): 1-4, 28.
Yang B J, Qian H B, Huang G B, et al. Research progress and rice-straw returning[J]. Journal of Agriculture, 2012, **2**(5): 1-4, 28.
- [5] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(3): 297-302.
Hu H X, Cheng Y, Ma Y H, et al. Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(3): 297-302.
- [6] Streets D G. Black smoke in China and its climate effects[A]. In: Special Panel on Alternative Energy Systems and Priority Environmental Issues for Asia[C]. New York: Asian Economic Panel Meeting, 2004. 7-8.
- [7] Singh B, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, et al. Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[J]. Advances in Agronomy, 2008, **98**: 117-199.
- [8] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(2): 292-302.
Li J F, Lu J W, Ren T, et al. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(2): 292-302.
- [9] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 612-619.
Zhang J, Wen X X, Liao Y C, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(3): 612-619.
- [10] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(1): 133-139.
Tang D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, **40**(1): 133-139.
- [11] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, **40**(4): 618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(4): 618-623.
- [12] Thomsen I K, Christensen B T. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley

- straw and ryegrass catch crops[J]. *Soil Use and Management*, 2004, **20**(4): 432-438.
- [13] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(5): 526-535.
- Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(5): 526-535.
- [14] Lou Y L, Xu M G, Wang W, *et al.* Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, **113**(1): 70-73.
- [15] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(2): 371-377.
- Hu N J, Han X Z, Yang M F, *et al.* Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(2): 371-377.
- [16] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(6): 1785-1792.
- Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, *et al.* Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(6): 1785-1792.
- [17] 蔡丽君, 张敬涛, 盖志佳, 等. 免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(5): 1127-1132.
- Cai L J, Zhang J T, Gai Z J, *et al.* Effect of the amount of stalk return to field on soil enzyme activities under no-tillage [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(5): 1127-1132.
- [18] 倪国荣, 涂国全, 魏赛金, 等. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(1): 149-154.
- Ni G R, Tu G Q, Wei S J, *et al.* Effects of straw-returning using agent on microbe and enzyme activity in rhizosphere soils and yield of late rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(1): 149-154.
- [19] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2655-2661.
- Hou Y H, Wang L, Fu X H, *et al.* Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2655-2661.
- [20] Li C F, Yue L X, Kou Z K, *et al.* Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **119**: 31-37.
- [21] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕和秸秆还田对土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(1): 85-90.
- Lu Y Q, Zhu A N, Zhang J B, *et al.* Effects of no-tillage and returning straw to soil on soil enzymatic activities and microbial population[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(1): 85-90.
- [22] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- Chen W L, Gao Y, Lin Y M, *et al.* Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [23] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [25] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(11): 3040-3044.
- Yang F, Dong Y, Xu M G, *et al.* Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(11): 3040-3044.
- [26] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田对水稻固碳特性及产量形成的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(10): 2885-2891.
- Pei P G, Zhang J H, Zhu L F, *et al.* Effects of straw incorporation on rice carbon sequestration characteristics and grain yield formation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(10): 2885-2891.
- [27] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(13): 3779-3787.
- Yang B J, Huang G Q, Xu N, *et al.* The effects of returning straw containing fertilizer with varying nutrient ratios on rice yield and soil fertility [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(13): 3779-3787.
- [28] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(3): 777-783.
- Gao F, Jia Z K, Lu W T, *et al.* Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(3): 777-783.
- [29] 郑成岩, 崔世明, 王东, 等. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2011, **37**(8): 1432-1440.
- Zheng C Y, Cui S M, Wang D, *et al.* Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, **37**(8): 1432-1440.
- [30] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(5): 81-85.
- Mu P, Zhang E H, Wang H N, *et al.* Effects of continuous returning straw to maize tillth soil on chemical character and microbial biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(5): 81-85.
- [31] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. *中国农业生态学报*, 2008, **16**(3): 607-610.
- Wang Y Q, Guo X S. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, **16**(3): 607-610.
- [32] Tang C, Yu Q. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue

- incorporation[J]. *Plant and Soil*, 1999, **215**(1): 29-38.
- [33] 顾元. 还田麦秸对水稻幼苗的化感作用及其调控技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
Gu Y. Allelopathic effects of wheat straw on rice seedling and its manipulation technique [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [34] 孙卫民, 杨滨娟, 钱海燕, 等. 秸秆还田配施不同配比化肥对晚稻产量及土壤肥力的影响[J]. *农学学报*, 2012, **2**(12): 16-21.
Sun W M, Yang B J, Qian H Y, *et al.* Effects of returning rice straw to fields with different ratio of fertilizer on rice yield and soil fertility[J]. *Journal of Agriculture*, 2012, **2**(12): 16-21.
- [35] 张雅洁, 陈晨, 陈曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(11): 2155-2161.
Zhang Y J, Chen C, Chen X, *et al.* Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(11): 2155-2161.
- [36] Heitkamp F, Wendland M, Offenberger K, *et al.* Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the rothamsted carbon model[J]. *Geoderma*, 2012, **170**: 168-175.
- [37] Saffih-Hdadi K, Mary B. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 594-607.
- [38] 吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等. 秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32**(9): 2855-2862.
Wu R M, Wang Y P, Li F M, *et al.* Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(9): 2855-2862.
- [39] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦-玉米产量的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(17): 5052-5061.
Li W, Qiao Y Q, Chen H, *et al.* Effects of combined straw and N application on the physicochemical properties of lime concretion black soil and crop yields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(17): 5052-5061.
- [40] 伍玉鹏, 刘田, 彭其安, 等. 氮肥配施下不同 C/N 作物残渣还田对红壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(10): 2053-2062.
Wu Y P, Liu T, Peng Q A, *et al.* Greenhouse gas emissions in red soil as influenced by different C/N residues under nitrogen applications[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(10): 2053-2062.
- [41] Pinggera J, Geisseler D, Merbach I, *et al.* Effect of substrate quality on the N uptake routes of soil microorganisms in an incubation experiment [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, **69**: 17-23.
- [42] 闫洪奎, 胡博, 高立祯. 长期施用秸秆及有机肥对辽宁北部棕壤土壤有效养分的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2013, **44**(6): 812-815.
Yan H K, Hu B, Gao L Z. Effects on available nutrients of brown soil in northern Liaoning under long-term use of straw and organic fertilizer [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2013, **44**(6): 812-815.
- [43] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(8): 1722-1728.
Chen D L, Yi Z X, Zhou W X, *et al.* Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(8): 1722-1728.
- [44] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(3): 522-528.
Lu W T, Jia Z K, Zhang P, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(3): 522-528.
- [45] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 168-176.
Tang W G, Xiao X P, Tang H M, *et al.* Effects of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 168-176.
- [46] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(5): 40-44, 62.
Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(5): 40-44, 62.
- [47] Tosti G, Benincasa P, Farneselli M, *et al.* Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, **43**: 136-146.
- [48] 孙伊辰, 廖文华, 汪红霞, 等. 秸秆还田下土壤磷、钾变化与产量效应[J]. *河北农业大学学报*, 2014, **37**(6): 7-12.
Sun Y C, Liao W H, Wang H X, *et al.* Straw management effects on soil phosphate and potassium contents and crop yield [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2014, **37**(6): 7-12.
- [49] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [50] 王丽娜. 黄麻秸秆还田及施用有机肥对滨海盐土的改良试验[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
Wang L N. Effects of application of jute straw and organic fertilizers on the coastal saline soil [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [51] 邱现奎, 董元杰, 万勇善, 等. 不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2010, **42**(2): 249-255.
Qiu X K, Dong Y J, Wan Y S, *et al.* Effects of different fertilizing treatments on contents of soil nutrients and soil enzyme activity [J]. *Soils*, 2010, **42**(2): 249-255.

- [52] Goyal S, Chander K, Mundra M C, *et al.* Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29**(2): 196-200.
- [53] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响 [J]. *作物杂志*, 2015, (2): 78-83.
Zhan H Q, Yan S S, Wang J R, *et al.* Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil [J]. *Crop*, 2015, (2): 78-83.
- [54] 钱海燕, 杨滨娟, 黄国勤, 等. 秸秆还田配施化肥及微生物菌剂对水田土壤酶活性和微生物数量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(3): 440-445.
- Qian H T, Yang B J, Huang G Q, *et al.* Effects of returning rice straw to fields with fertilizers and microorganism liquids on soil enzyme activities and microorganisms in paddy fields [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(3): 440-445.
- [55] 刘建国, 卞新民, 李彦斌, 等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(5): 1027-1032.
Liu J G, Bian X M, Li Y B, *et al.* Effects of long-term continuous cropping of cotton and returning cotton stalk into field on soil biological activities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(5): 1027-1032.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行