

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 2 期

2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111201769

武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 万水霞, 王允青, 许征宇, 张晓玲. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 0565-0575.

Wu J, Guo X S, Lu J W, Wan S X, Wang Y Q, Xu Z Y, Zhang X L. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0565-0575.

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响

武 际^{1,2,3,*}, 郭熙盛^{1,3}, 鲁剑巍², 万水霞¹, 王允青¹, 许征宇³, 张晓玲¹

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070;

3. 安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230031)

摘要: 采用尼龙网袋法于 2007—2008 年连续 2a 在水稻常规栽培和节水灌溉栽培模式下, 研究小麦秸秆腐解特征、养分释放规律及对土壤微生物数量、酶活性和养分状况的影响。结果表明: 秸秆还田后, 在 0—30d 腐解较快, 后期腐解速率逐渐变慢。90 d 时累计腐解率达到了 48.9%—61.3%。秸秆中养分释放速率表现为 $K > P > N \approx C$ 。节水栽培模式下小麦秸秆还田腐解率和养分释放率均显著高于常规栽培。秸秆还田后, 土壤微生物数量以及土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均呈现“前期迅速增加, 中期急剧减少, 后期缓慢减少”的变化特征, 而纤维素酶活性呈现“前期剧升、中期缓增、后期骤降”的变化趋势。小麦秸秆在节水栽培模式下还田土壤微生物数量和酶活性均显著高于常规栽培。适当增加秸秆用量可以提高微生物数量和酶活性, 用量过高对细菌和放线菌数量有负效应。秸秆还田可显著提高土壤有机碳和养分含量。土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷含量在整个试验期间均呈增加趋势。速效钾含量在秸秆还田 30 d 时达到最高, 而后则逐渐降低。节水栽培模式下秸秆还田后土壤有机碳和养分含量的提高效应显著高于常规栽培。提高秸秆用量对土壤养分含量有显著的正效应。

关键词: 水稻栽培模式; 小麦秸秆; 腐解特征; 生物学特性; 养分状况

Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation

WU Ji^{1,2,3,*}, GUO Xisheng^{1,3}, LU Jianwei², WAN Shuixia¹, WANG Yunqing¹, XU Zhengyu³, ZHANG Xiaoling¹

1 Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

3 Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling, Resources & Environment, Hefei 230031, China

Abstract: The decomposition characteristics of wheat straws and their effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation were studied in the 2007 and 2008 growth seasons, respectively. Wheat straws were wrapped in net nylon bags and embedded into the soil under conventional cultivation and a water-saving cultivation model. The rate of straw decomposition was greatest within the first 30 days and then decreased until the end of the experiment. Straw decomposition under the water-saving cultivation model was faster than straw decomposition under conventional cultivation, and the wheat straw cumulative decomposition rates were 48.9%—61.3%. The sequence of nutrient release rates were $K > P > N \approx C$. The effect of the cultivation model and incorporation method on N, P and C release patterns followed almost the same trend as the decomposition of straw. Soil microbial biomass increased rapidly in the early growth stage after wheat

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划重点资助项目(2011BAD16B06); 国家“十一五”科技支撑计划重点资助项目(2010BAD01B05)

收稿日期: 2011-11-20; **修订日期:** 2012-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuji338@163.com

straw was returned to the field, but decreased significantly in the middle growth stage and reduced slowly in the late growth stage. Urease, alkaline phosphatase and sucrase activities in the soil followed the same pattern as the microbial biomass after straw mulching. However, cellulase activity was different in that it increased rapidly in the early growth stage, improved slowly in the middle growth stage and decreased rapidly in the late growth stage. Microbial numbers and enzyme activities under the water-saving cultivation model were significantly higher than under conventional cultivation. Increasing the amount of wheat straw could improve microbial numbers and enzyme activities, but excessive straw would have a negative effect on bacterial and actinomycete numbers.

The results also showed that soil nutrient contents could be improved noticeably by returning straw to the field. After straw mulching, organic carbon, total nitrogen, alkali-hydro nitrogen, and available phosphorus contents increased throughout the whole trial period. The available potassium content was highest after 30 days of straw mulching, and then decreased gradually. Nutrient contents under the water-saving cultivation model were higher than under conventional cultivation. Increasing the amount of straw had a positive effect on soil nutrient contents.

Key Words: rice cultivation model; wheat straw; decomposition characteristics; biological properties; nutrient status

近年来,国内外科学家在秸秆还田对培肥土壤及提高作物产量等方面做了大量研究,基本明确了秸秆还田对提高作物产量和土壤有机碳含量、培肥地力和维持土壤持久生产力的重要作用^[1-5]。据估算,我国每年生产的秸秆在6—7亿t之间^[6],在集约化生产条件下,单位面积上还会有更大数量的作物秸秆产生,秸秆还田后的腐解速度和养分释放特点是秸秆还田能否发挥重要作用的关键。秸秆直接还田进入土壤后,将在土壤微生物和酶的作用下进行腐解。其腐解速率一方面受限于土壤微生物和酶活性的高低,另一方面又必然对土壤生物学特性产生重大作用,通过复杂的生物学效应影响到土壤内部的物质和能量运转^[2,7]。土壤酶活性是土壤生物活性和土壤肥力的重要指标,其中土壤蔗糖酶、磷酸酶、脲酶等水解酶的总体活性对评价土壤肥力水平更具有重要意义^[8-10]。土壤微生物直接参与有机质的分解、腐殖质的形成、养分的转化和循环的各个生化过程^[11],是植物养料转化、有机碳代谢及污染物降解的驱动力,在土壤肥力和生态系统中具有重要的作用^[12-13]。国内外研究表明,秸秆还田作为一种能够使秸秆变废为宝的土壤培肥措施,它能够改善土壤物理和化学性质,为微生物和土壤酶活性的增强提供良好环境^[14-15]。因此,在研究秸秆还田培肥土壤的效应时,探明由此引起的土壤微生物和酶活性的动态变化,对评价秸秆还田的效应具有重要意义。

以前对秸秆还田的研究多集中在淹水稻田或旱作土壤上进行,且大多局限于秸秆还田后对作物产量、品质以及对农田土壤理化性质的影响。当前,无水层节水灌溉栽培技术作为一种既可高效利用水资源又可提高水稻产量的重要措施,在水稻主产区得到了大面积的推广应用。无水层灌溉下的土壤养分状况、理化性质以及生物学性质既不同于淹水稻田土壤,也不同于灌溉的旱地土壤,这势必影响到秸秆还田后的养分释放规律、土壤的生物学特性以及对地力的培肥效应。为此,笔者以小麦秸秆为研究对象,同步研究了不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征、养分释放规律及对土壤养分含量和生物学特性的影响,以期对秸秆资源的合理利用和农田养分的科学管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2007—2008年连续两年在安徽省天长市进行。供试土壤为水稻土。2007、2008年两个试验田块0—20cm土层基础养分、微生物数量以及土壤酶活性分别为:有机质11.0 g/kg和11.1 g/kg,全氮1.2 g/kg和1.2 g/kg,碱解氮116.5 mg/kg和107.2 mg/kg,全磷0.3 g/kg和0.4 g/kg,速效磷11.1 mg/kg和11.2 mg/kg,缓效钾412.2 mg/kg和465.8 mg/kg,速效钾98.5 mg/kg和112.3 mg/kg,pH值6.1和6.8,土壤细菌数量 123.2×10^4 CFU/g和 106.6×10^4 CFU/g,真菌数量 22.8×10^3 CFU/g和 23.8×10^3 CFU/g,放线菌数量 93.4×10^3 CFU/g和 85.8×10^3 CFU/g,土壤脲酶活性 $289.8 \mu\text{g NH}_4\text{-N}/(\text{g } 24 \text{ h})$ 和 $324.6 \mu\text{g NH}_4\text{-N}/(\text{g } 24 \text{ h})$,碱性磷酸

酶活性 $36.9 \mu\text{g}/(\text{g h})$ 和 $32.7 \mu\text{g}/(\text{g h})$, 蔗糖酶活性 $16.8 \mu\text{g}/(\text{g 24 h})$ 和 $19.6 \mu\text{g}/(\text{g 24 h})$, 纤维素酶活性 $8.3 \mu\text{g}/(\text{g 72 h})$ 和 $11.0 \mu\text{g}/(\text{g 72 h})$ 。2007、2008 年供试小麦秸秆基本养分含量分别为:全碳 48.7% 和 47.3%, 全氮 0.5% 和 0.5%, 全磷 0.1% 和 0.1%, 全钾 1.0% 和 1.1%。水稻供试品种为扬两优 6 号。

1.2 试验设计

试验采用尼龙网袋研究方法^[16]。网袋长 30 cm, 宽 20 cm, 孔径为 0.12 mm。设 2 种水稻种植模式: 常规栽培(C)和节水灌溉栽培(S); 3 个秸秆用量: 20 g/网袋(I), 40 g/网袋(II), 60 g/网袋(III)。完全方案设计, 重复 3 次, 随机区组排列。供试小麦秸秆风干后, 剪切至 5 cm 左右放入尼龙网袋中, 扎紧袋口。水稻常规栽培是指除“烤田期”外, 其余生长阶段土壤表层均保持浅水层状态。而水稻节水灌溉栽培是指采用无水层灌溉技术, 即在水稻返青后的各个生育阶段, 田面不再建立水层。根据水稻生理生态需水特点, 以根层土壤含水量作为控制指标, 确定灌水时间和灌水定额, 土壤含水量低于田间持水量的 80% 时即开始灌水, 以田间持水量的 100% 做上限^[17]。水稻于 6 月 16 日移栽, 5 d 后将装满秸秆的尼龙网袋埋入稻田行间 10—15 cm 土层。施 N 210 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²。氮肥分别做基肥、分蘖肥和穗肥 3 次施用, 施用比例为 4:3:3, 全部磷钾肥作基肥施用。基肥于耙田前撒施。肥料种类: 尿素, 过磷酸钙, 氯化钾。

1.3 采样方法与测定项目

施入秸秆后, 各处理每 30 d 取样 1 次, 整个生育期共取 3 次。取样后样品经洗净、80 °C 烘干, 利用失重法测定秸秆腐解率。秸秆腐解率(%) = (原秸秆重 - 秸秆残留量)/原秸秆重 × 100。分别测定小麦秸秆原始样的全 C、全 N、全 P、全 K 养分含量。每次取样后测定秸秆的全 C、全 N、全 P、全 K 含量, 计算秸秆养分释放率。养分释放率(%) = (原始秸秆某养分含量 - 剩余秸秆养分含量)/原始秸秆养分含量 × 100。取样秸秆以 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 重铬酸钾容量法-外加热法测含碳量, 凯氏定氮法测定含氮量, 钼锑抗比色法测含磷量, 火焰光度法测含钾量^[18]。

从稻田中取出尼龙网袋之前, 采集网袋正上方土壤样品, 截取与网袋接触面约 7 cm 土壤样品待分析测试用。过 2 mm 筛并置于 4 °C 条件下冷藏。分别测定土壤微生物数量(细菌、真菌、放线菌)、土壤酶活性(脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶)和土壤养分含量(有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾)。

土壤微生物测定: 采用稀释平板法测定土壤微生物总数。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌采用马丁氏(Martin)培养基、放线菌采用改良高氏一号培养基^[19], 结果以每克鲜土所含数量表示。土壤酶测定: 土壤脲酶、蔗糖酶分别采用靛酚蓝比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[20], 碱性磷酸酶、纤维素酶分别采用对硝基苯磷酸钠法、3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[21]。

土壤养分测定: K₂Cr₂O₇-外加热法测有机质, 半微量凯氏法测全氮, 碱解扩散法测碱解氮, 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色测速效磷, 1 mol/L 热 HNO₃ 浸提-火焰光度法测速效钾, 1 mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度法测速效钾^[18]。

1.4 数据分析方法

本文数据均采用 SAS9.0 软件和 Excel2010 软件进行统计分析。采用 LSD 法对试验数据进行方差分析和显著性测验。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式和秸秆还田量对小麦秸秆腐解率的影响

连续两年的试验结果显示(表 1), 小麦秸秆的腐解率表现为前期快, 后期慢的特点: 0—30 d 为快速腐解期, 2007 和 2008 年的秸秆平均腐解速率分别达到了 0.4 g/d 和 0.5 g/d; 30 d 之后, 小麦秸秆的腐解速率逐渐放缓, 2007、2008 两年的秸秆平均腐解速率均只有 0.1 g/d。90 d 时小麦秸秆累计腐解率达到了 48.9%—59.3% (2007) 和 48.9%—61.3% (2008)。不同栽培模式对小麦秸秆的腐解率有显著影响。在相同秸秆还田用量情况下, 节水栽培模式与常规栽培模式相比(90 d), 2007 年小麦秸秆腐解率提高了 15.7%—18.6%, 2008 年提高幅度为 14.8%—17.3%, 处理间差异显著($P < 0.05$)。相同栽培模式下, 随着秸秆用量的增加, 小

麦秸秆腐解率有降低的趋势。用量间秸秆腐解率的差异仅在 30 d 时达到显著水平,随着秸秆腐解时间的延长,这种差异逐渐减小,60 d 和 90 d 时,用量间秸秆腐解率的差异均不显著。两年的试验结果规律相同。

表 1 不同栽培模式和秸秆还田量对小麦秸秆腐解率的影响/%

Table 1 Effect of different treatments on decomposing rates of the wheat straws

处理 Treatment	2007			2008		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	33.0c	42.5b	50.0b	32.8d	43.5b	52.5b
C II	30.1d	41.6b	48.9b	30.7e	42.3b	51.1b
C III	28.2e	40.8b	48.9b	28.6f	40.8b	50.5b
S I	38.6a	50.2a	59.3a	39.0a	52.1a	61.3a
S II	36.3b	48.1a	57.9a	37.8b	51.0a	60.0a
S III	33.5c	46.5a	56.5a	36.8c	49.3a	58.0a

不同的小写字母表示同一列数据 LSD ($P<0.05$) 水平差异显著性; C: 常规栽培; S: 节水灌溉栽培; I、II、III 分别代表秸秆 3 个用量 20 g/网袋、40 g/网袋和 60 g/网袋

2.2 不同栽培模式和秸秆还田量对小麦秸秆养分释放规律的影响

不同处理对小麦秸秆养分释放规律的影响见表 2、表 3。试验结束时,2007 年小麦秸秆中 48.2%—65.8% 的碳、40.4%—54.2% 的氮和 62.7%—74.7% 的磷被释放。2008 年小麦秸秆的养分释放率略高于 2007 年,但是差异不明显,约有 47.1%—66.0% 的碳、42.3%—59.3% 的氮和 60.4%—76.7% 的磷被释放。全部处理中,均是以节水栽培模式下 20 g/网袋处理(CI、SI)碳、氮、磷养分释放率最大。连续两年的试验结果均显示节水栽培模式下小麦秸秆碳、氮、磷养分释放率显著高于常规栽培($P<0.05$)。与秸秆腐解率相似,小

表 2 2007 年不同栽培模式和秸秆还田量对小麦秸秆养分释放率的影响

Table 2 Effect of different treatments on nutrient release rates of the wheat straws in 2007

处理 Treatment	C/%			N/%			P/%			K/%		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	42.9c	47.8c	51.9b	28.2c	37.8c	42.6b	44.0c	55.1b	64.3b	92.9ab	93.2a	93.4ab
C II	40.9cd	46.3cd	49.6b	27.4cd	36.6cd	41.3b	44.0c	54.8b	63.4b	91.6ab	91.8ab	92.0ab
C III	39.6d	44.6d	48.2b	26.8d	35.7d	40.4b	42.0c	54.3b	62.7b	88.4b	88.6b	89.3b
S I	53.3a	61.2a	65.8a	37.9a	46.5a	54.2a	55.5a	68.2a	74.7a	97.2a	97.1a	97.2a
S II	51.8a	58.4ab	63.7a	35.8ab	43.3ab	52.8a	54.2a	67.5a	73.8a	95.8a	95.8a	96.0a
S III	47.9b	56.7b	62.0a	34.6b	42.2b	49.7a	52.9b	67.1a	72.1a	93.9a	94.0a	94.1a

表 3 2008 年不同栽培模式和秸秆还田量对小麦秸秆养分释放率的影响

Table 3 Effect of different treatments on nutrient release rates of the wheat straws in 2008

处理 Treatment	C/%			N/%			P/%			K/%		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	42.0b	46.3b	51.0b	29.3b	38.6c	44.5b	47.6b	54.6b	62.2b	93.5a	93.6a	93.9a
C II	38.7b	43.0b	48.3b	28.5b	37.5c	43.6b	46.5b	52.8b	61.5b	91.9a	92.1a	92.9a
C III	37.6b	41.3b	47.1b	28.3b	37.1c	42.3b	45.1b	52.8b	60.4b	89.6a	90.7a	90.9a
S I	53.7a	61.3a	66.0a	40.0a	49.6a	59.3a	58.6a	71.8a	76.7a	92.8a	93.9a	95.0a
S II	51.9a	58.2a	63.8a	39.4a	48.2ab	57.3a	57.7a	70.5a	75.6a	91.9a	92.7a	94.0a
S III	49.8a	56.3a	61.6a	38.2a	46.2b	56.3a	57.0a	69.9a	74.3a	91.3a	91.8a	92.5a

麦秸秆碳、氮、磷养分释放率随着秸秆用量的提高而降低;而小麦秸秆碳、氮、磷养分释放量则随着秸秆用量的提高而增加,均是以处理 60 g/网袋达到最高,且处理间差异显著($P<0.05$)。秸秆中钾的释放主要分两个时期:0—30 d 为快速释放期。在此阶段,秸秆中已经有超过 90% 的钾被释放出来;30—90 d 为腐解停滞

期,各处理间钾的释放率无明显差异。

2.3 不同栽培模式和秸秆还田量对土壤微生物数量的影响

表4、表5的结果显示,无论是在常规栽培还是在节水栽培模式下,与未施秸秆处理相比,土壤微生物数量在秸秆还田后得到了显著提高。其总的变化趋势为:0—30 d期间微生物数量不断增加,至30 d时达到最高值。然后在30—60 d期间急剧下降,60—90 d下降幅度放缓,这与秸秆腐解的趋势相一致。2007和2008年表现出相同的趋势。未施秸秆两对照处理(CK1、CK2)细菌和放线菌数量也是在30 d时达到峰值,这可能和水稻生长正处于分蘖盛期,代谢活动旺盛有关。由表4和表5还可以看出,不施秸秆处理土壤放线菌数量变化趋势与细菌和真菌不同,在整个试验期间土壤放线菌数量均呈现下降趋势。至试验结束时,比基础土壤放线菌数量降低了47.2%—52.0%(常规栽培)和39.8%—43.2%(节水栽培)。其原因有待于进一步研究。

表4 2007年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤微生物数量的影响

Table 4 Effect of different treatments on the quantity of soil microbe in 2007

处理 Treatment	细菌 Bacteria /($\times 10^4$ CFU/g)			真菌 Fungi /($\times 10^3$ CFU/g)			放线菌 Actinomycetes /($\times 10^3$ CFU/g)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	268.4c	125.3c	117.3c	32.8f	21.5f	20.8f	114.8c	97.7c	96.7c
C II	316.9b	189.3b	176.0b	41.5e	24.6e	23.2e	150.7b	121.1b	114.0b
C III	176.4e	90.7de	85.3e	44.2d	26.6d	24.9d	90.1d	79.3d	77.6d
S I	322.8b	172.1b	163.9b	46.9c	31.1c	29.8c	142.0b	121.9b	119.6b
S II	396.9a	208.6a	189.8a	50.0b	36.0b	34.2b	167.3a	148.6a	143.3a
S III	195.8d	99.9d	93.5d	53.8a	38.7a	36.4a	112.4c	99.3c	98.5c
CK1	171.8e	87.0e	79.3f	31.5f	20.9f	18.5g	67.5f	54.2f	49.3f
CK2	193.6d	118.6c	95.1d	46.0cd	30.9c	20.9f	73.0e	60.8e	53.1e

表5 2008年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤微生物数量的影响

Table 5 Effect of different treatments on the quantity of soil microbe in 2008

处理 Treatment	细菌 Bacteria /($\times 10^4$ CFU/g)			真菌 Fungi /($\times 10^3$ CFU/g)			放线菌 Actinomycetes /($\times 10^3$ CFU/g)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	252.2e	162.2d	151.0e	33.8e	19.6f	18.5f	142.5d	84.7d	81.6d
C II	297.6d	213.9b	196.7c	49.5d	27.2e	25.5e	172.0c	96.9c	92.7c
C III	213.3f	125.8e	121.6f	54.1c	29.6d	27.3d	134.0d	71.7e	69.0e
S I	351.1b	221.2b	214.0b	55.6c	34.1c	33.1c	191.1b	137.4b	133.3b
S II	410.0a	255.3a	247.7a	88.9b	50.7b	48.9b	206.7a	159.7a	157.3a
S III	321.7c	185.0c	172.8d	94.9a	54.8a	52.0a	162.3c	102.0c	100.0c
CK1	211.3f	122.1e	94.8g	32.4e	18.3f	17.0g	64.1f	55.5g	44.2g
CK2	316.2cd	163.1d	158.0e	54.3c	34.1c	29.1d	76.1e	61.3f	51.7f

整个水稻生育期,节水栽培模式下秸秆还田后土壤微生物数量显著高于常规栽培(表4、表5)。试验90 d时,节水栽培比常规栽培土壤细菌数量增加了7.9%—42.1%,真菌数量增加了43.1%—91.5%,放线菌数量增加了23.7%—69.8%。说明在节水栽培模式下,秸秆还田更能够显著刺激水稻生长期间土壤微生物的大量繁殖,并且随着秸秆还田用量的增加,这种刺激作用也随之增强。土壤真菌数量随着还田秸秆用量的提高表现出增加的趋势,3个秸秆用量间真菌数量的差异均达到显著水平。而土壤细菌和放线菌数量是在秸秆中用量水平(CII、SII)时达到最大,继续提高秸秆用量,细菌和放线菌数量有降低的趋势。这可能与秸秆用量过大,导致氧化还原电位下降及产生一些不利于细菌和放线菌生长的有毒物质有关。

2.4 不同栽培模式和秸秆还田量对土壤酶活性的影响

由两年的试验结果可以看出(表6、表7),秸秆还田可以显著提高土壤酶活性。土壤脲酶、碱性磷酸酶和

蔗糖酶活性在秸秆还田后开始上升,至 30 d 形成峰值,30 d 时以节水栽培模式下小麦秸秆还田量 60 g/网袋处理(CIII、SIII)土壤酶活性最高。30—60d 期间土壤酶活性急剧下降,60—90 d 呈现出缓慢降低的趋势。土壤纤维素酶活性的变化规律与前 3 种酶略有不同(表 8),呈现“前期剧升(30 d)、中期缓增(60 d)、后期骤降(90 d)”的变化趋势,这可能与秸秆纤维素比蛋白质、淀粉、脂肪和半纤维素等分解难度更大有关。

表 6 2007 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的影响

Table 6 Effect of different treatments on activity of Urease, Alkaline Phosphatase and Sucrase in 2007

处理 Treatment	脲酶 Urease /($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$)			碱性磷酸酶 Alkaline Phosphatase /($\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)			蔗糖酶 Sucrase /($\mu\text{g g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	435.1c	356.7d	342.4c	63.0d	44.8d	36.7d	26.0d	20.8d	20.3d
C II	460.8c	372.7cd	357.7bc	66.6c	50.3c	42.9c	29.0c	24.6c	24.3c
C III	486.4b	400.2bc	377.6b	71.4b	54.9b	48.9b	34.9b	28.6b	27.7b
S I	456.9c	379.2bc	368.4b	67.8c	48.9c	40.1c	27.6c	22.0c	21.7c
S II	493.0ab	415.4ab	405.4a	71.6b	54.0b	45.5b	32.1b	27.0b	26.7b
S III	512.2a	435.9a	427.1a	75.4a	58.8a	52.2a	41.8a	32.6a	32.0a
CK1	404.8d	322.8e	252.6d	64.2cd	42.1e	35.4d	23.5e	20.2d	19.8d
CK2	407.7d	323.2e	254.4d	65.2cd	42.3e	37.1d	24.9de	21.8cd	20.9cd

表 7 2008 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的影响

Table 7 Effect of different treatments on activity of Urease, Alkaline Phosphatase and Sucrase in 2008

处理 Treatment	脲酶 Urease /($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$)			碱性磷酸酶 Alkaline Phosphatase /($\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)			蔗糖酶 Sucrase /($\mu\text{g g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	541.8c	476.0c	447.9d	58.8d	48.5d	38.4de	31.7d	25.9d	25.0d
C II	573.5bc	496.6bc	463.8cd	63.8c	51.8c	44.2c	39.6c	30.3c	29.3c
C III	591.5b	513.5b	487.3bc	71.7b	55.6b	49.9b	44.7b	35.1b	33.4b
S I	575.1b	506.5b	488.7b	62.1c	51.4c	43.5c	35.7c	28.7c	27.8c
S II	616.5ab	524.7ab	505.8ab	67.7b	55.0b	48.2b	43.9b	36.1b	35.7b
S III	635.9a	543.0a	531.0a	76.8a	59.3a	53.5a	52.9a	40.3a	39.3a
CK1	469.8d	380.2d	322.7e	51.0e	44.8e	36.0e	28.5e	24.1e	22.8e
CK2	473.0d	384.8d	326.9e	52.3e	46.1e	38.8d	29.9e	25.1d	23.9de

表 8 不同栽培模式和秸秆还田量对土壤纤维素酶活性的影响/($\mu\text{g g}^{-1} 72 \text{ h}^{-1}$)

Table 8 Effect of different treatments on activity of Cellulase

处理 Treatment	2007			2008		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	9.4e	10.0e	8.9cd	12.6e	14.0d	11.9e
C II	11.2c	11.8d	9.3bc	14.2c	15.9c	13.3c
C III	12.7b	13.9b	10.9a	16.0b	17.5b	14.2b
S I	10.6cd	11.5d	8.3d	14.1c	15.3c	13.1cd
S II	12.4b	12.9c	9.7b	16.5b	17.7b	13.4c
S III	14.2a	14.8a	11.4a	20.1a	21.1a	15.5a
CK1	9.2e	9.8f	8.2d	12.5e	13.8e	11.2e
CK2	10.2d	10.7e	8.4d	13.3d	14.8d	12.5d

不同水稻栽培模式下秸秆还田对土壤酶活性也有明显影响。小麦秸秆腐解 90 d 时,节水栽培比常规栽培土壤脲酶活性提高了 7.6%—13.4%,碱性磷酸酶活性提高了 6.0%—13.2%,蔗糖酶活性提高了 6.6%—21.8%,纤维素酶活性提高了 1.4%—10.8%。差异均达到了显著水平。说明节水栽培模式下的土壤环境更

有利于土壤酶活性的提高。3 个秸秆用量处理间土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性的差异均达到显著水平。而土壤脲酶活性在高秸秆用量水平(CIII、SIII)与低秸秆用量水平(CI、SI)之间差异也达到了显著水平,表明适当提高秸秆还田用量,可以为土壤酶提供更多的能源和营养物质,进而促进了土壤酶活性的增强。

2.5 不同栽培模式和秸秆还田量对土壤有机碳和养分状况的影响

连续两年的试验结果表明(表 9—表 12),秸秆还田可显著提高土壤有机碳和养分含量。90 d 试验结束时,以节水栽培模式下小麦秸秆还田量 60 g/网袋处理(CIII、SIII)有机碳和养分含量最高。整个试验期间,土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷含量呈增加趋势,提高幅度与秸秆腐解速率的变化趋势相一致。0—30 d 为秸秆快速腐解期,30 d 时秸秆养分释放率达到最高值,土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷含量增加的幅度也相应达到最大值。30 d 后,还田秸秆养分释放速度减缓,土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷含量增幅也相应的降低。由于秸秆中 90% 的钾在 30 d 时就被释放出来,土壤速效钾含量在秸秆还田 30 d 时达到最高后,呈现逐渐降低的趋势。

表 9 2007 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤有机碳和全氮含量的影响

Table 9 Effect of different treatments on organic carbon and total N contents of the soil in 2007

处理 Treatment	有机碳含量 Contents of organic carbon/(g/kg)			全氮含量 Contents of total N/(g/kg)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	11.9d	12.1d	12.2d	1.3b	1.3c	1.4b
C II	12.5cd	12.7cd	12.9cd	1.3b	1.4bc	1.5ab
C III	12.6bc	12.9bc	13.0bc	1.4ab	1.5ab	1.5ab
S I	12.6bc	13.0bc	13.1bc	1.3b	1.4bc	1.4b
S II	13.2ab	13.6ab	13.9ab	1.4ab	1.6a	1.6a
S III	13.3a	14.0a	14.1a	1.5a	1.6a	1.6a
CK1	11.6d	11.4e	11.2e	1.3b	1.2c	1.2c
CK2	12.0cd	11.8de	11.4de	1.3b	1.2c	1.2c

表 10 2008 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤有机碳和全氮含量的影响

Table 10 Effect of different treatments on organic carbon and total N contents of the soil in 2008

处理 Treatment	有机碳含量 Contents of organic carbon/(g/kg)			全氮含量 Contents of total N/(g/kg)		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	12.0d	12.2cd	12.3c	1.3bc	1.3cd	1.3cd
C II	12.6cd	12.9bc	13.0bc	1.4ab	1.5ab	1.5ab
C III	12.9bc	13.0b	13.1b	1.4ab	1.5ab	1.5ab
S I	12.9bc	13.2b	13.3b	1.3bc	1.4bc	1.4bc
S II	13.6ab	13.9a	14.0a	1.4ab	1.5ab	1.6a
S III	13.7a	14.1a	14.1a	1.5a	1.6a	1.6a
CK1	12.0d	11.8d	11.2d	1.2c	1.2d	1.2d
CK2	12.2d	12.0cd	11.6cd	1.3bc	1.3cd	1.3cd

在秸秆还田量相同情况下,不同水稻栽培模式对秸秆还田后土壤有机碳、碱解氮和速效磷含量的变化有显著效应,而对土壤全氮、速效钾含量变化影响不明显。2007、2008 两年的试验结果基本一致。节水栽培模式与常规栽培模式相比,试验结束时土壤有机碳含量增加了 7.5%—8.2%;碱解氮含量增加了 5.4%—8.8%;速效磷含量增加了 5.4%—12.4%,差异显著($P<0.05$)。这可能和节水栽培模式下小麦秸秆腐解能释放出更多的碳、氮、磷养分有关。在相同水稻栽培模式下,随着秸秆用量的提高,土壤有机碳和养分含量也随之增加,均是以节水栽培模式下秸秆最高用量处理(SIII)有机碳和养分含量达到最高。90 d 时,处理 60 g/网袋与 20 g/网袋土壤的有机碳和碱解氮含量差异达到了显著水平;而对于土壤全氮、速效磷和速效钾含量来说,处理 60 g/网袋、40 g/网袋与 20 g/网袋差异均达到了显著水平,而 60 g/网袋与 40 g/网袋处理间差异不

显著。

表 11 2007 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤速效养分含量的影响

Table 11 Effect of different treatments on soil available nutrient contents in 2007

处理 Treatment	碱解氮含量/(mg/kg) Contents of available N			速效磷含量/(mg/kg) Contents of available P			速效钾含量/(mg/kg) Contents of available K		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	135.4c	142.5d	143.6d	13.1e	13.8d	14.0c	122.5cd	115.0c	110.7bc
C II	140.0bc	149.4cd	152.0cd	14.5cd	15.7bc	15.9b	129.3c	125.6b	123.5a
C III	148.6ab	156.5b	158.7ab	15.2bc	16.7ab	16.7ab	137.6ab	133.6a	130.5a
S I	143.1b	151.1bc	153.2bc	14.0c	15.3c	15.8b	124.6c	118.8c	115.1b
S II	148.8ab	160.0ab	161.5ab	15.6ab	16.8a	17.0a	131.6bc	126.3b	124.8a
S III	156.6a	166.2a	166.6a	16.6a	17.6a	17.6a	140.1a	134.5a	131.9a
CK1	132.4c	127.9e	122.9e	13.1e	12.3e	11.7d	120.6d	112.7c	106.3c
CK2	136.3c	133.2e	126.5e	13.6d	13.1de	12.7d	123.9cd	115.4c	109.8bc

表 12 2008 年不同栽培模式和秸秆还田量对土壤速效养分含量的影响

Table 12 Effect of different treatments on soil available nutrient contents in 2008

处理 Treatment	碱解氮含量/(mg/kg) Contents of available N			速效磷含量/(mg/kg) Contents of available P			速效钾含量/(mg/kg) Contents of available K		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
C I	128.7d	134.9c	135.6d	13.4e	14.1d	14.2d	124.7c	120.8cd	118.9cd
C II	132.9bc	140.2b	142.6cd	14.8cd	16.1bc	16.1c	132.2b	128.8b	126.0b
C III	137.0b	144.5b	146.7bc	15.5bc	16.7bc	16.7bc	141.7a	136.0a	132.6ab
S I	137.4b	143.5b	145.3bc	14.3d	15.7c	16.0c	126.7bc	123.1c	121.1c
S II	141.6ab	149.4ab	151.1ab	15.9ab	17.2a	17.2a	133.3b	130.8b	128.5ab
S III	149.6a	157.7a	158.6a	16.9a	17.8a	17.8a	142.4a	137.7a	135.2a
CK1	127.8d	121.1d	116.4e	13.1e	12.8e	11.7e	123.8c	114.9d	108.5d
CK2	128.7d	124.3d	116.9e	14.1d	13.3de	12.1e	129.9bc	118.6cd	112.1d

进一步分析土壤有机碳和养分含量与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性的相关性表明,除速效钾含量与脲酶相关性达到显著水平外($r=0.678$ 。 $r_{0.05}=0.576$, $r_{0.01}=0.708$ 。),土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量与脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性的相关性均达到极显著水平($r=0.843-0.992$)。

3 讨论

连续两年的研究表明小麦秸秆腐解总的特征是前期快,后期慢,秸秆中养分释放主要集中在前 30d。秸秆养分释放率表现为 $K>P>N\approx C$ 。90 d 时,小麦秸秆累计腐解率为 48.9%—61.3%。89.3%—97.2% 的钾、60.4%—76.7% 的磷、40.4%—59.3% 的氮和 47.1%—66.0% 的碳被释放出来。这一结果表明经过 90 d 的腐解,秸秆中纤维素等物质在秸秆还田初期基本就腐解完毕,剩余部分主要为难分解的有机物质如木质素等^[22-24]。

微生物作为产生纤维素酶类的主要来源,在秸秆的腐解过程中发挥了巨大作用^[25]。陈冬林等在水稻常规栽培模式下研究发现秸秆还田可以使土壤真菌和嫌气性细菌数量减少,放线菌和好气性细菌数量增加^[26]。而本试验结果则显示,不同水稻栽培模式下秸秆还田对土壤微生物数量的影响存在明显差异,节水栽培模式下土壤细菌、真菌和放线菌数量均显著高于常规栽培模式,究其原因主要是与两种水稻栽培模式下土壤环境的不同有关。一方面节水栽培模式下稻田处于干湿交替过程中,土壤由长期淹水的还原状态(常规栽培)变为类似于旱地的氧化状态(节水栽培),通气、透水状况明显改善。土壤中的生物化学过程也随之发生了一系列的变化,养分元素的还原过程受到抑制;另一方面节水栽培模式下,由于灌溉用水量的减少和田面淹水层的消失,氮、磷等可溶性营养元素的渗漏损失会随之显著降低。同时节水栽培下稻田水分和氧化还原状态的直

接改变在很大程度上也影响了有机质的分解转化以及土壤容重、土壤孔隙等物理性状,从而对稻田微生物的数量和活性产生显著影响。以上这些因素均可作为微生物生长提供稳定和均匀的条件,进而促进微生物在秸秆表面的大量富集并不断的分解新鲜秸秆,加速了秸秆的腐解和养分释放。

众多学者研究表明,在水稻常规栽培模式下秸秆还田可以提高土壤养分含量,是土壤养分平衡和耕地土壤持续利用的重要措施^[27-28]。本研究结果也证实了前人的结论,秸秆腐解释放出来的丰富的 C、N、P、K 养分可以作为土壤中植物所需营养元素的有效补充,对土壤有机碳和养分含量的增加产生了显著正效应。本试验进一步研究发现节水栽培模式下秸秆还田后土壤有机碳和养分含量增加的更为显著。与常规栽培相比,节水栽培模式不但显著提高了土壤微生物数量,而且对土壤酶活性的上升也有明显的正效应。进一步分析结果显示土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈显著或极显著正相关。因此,节水栽培模式下土壤肥力状况显著高于常规栽培,不仅仅是由于节水栽培模式下秸秆能够释放出更多的营养元素,更深层次的原因在于节水栽培模式下的土壤环境更加有利于刺激微生物和酶活性的提高,使土壤的生化过程活跃起来。众所周知,土壤微生物和酶是土壤有机质和土壤养分循环和转化的主要动力,对土壤养分供应起着重要作用^[29]。土壤微生物一方面是作为有机残体降解和腐殖化过程的直接参与者,对土壤有机碳等元素在各库之间的转移起直接作用;另一方面微生物体及其分泌物中的 N、P、S 及其它营养元素是植物可直接利用的速效养分^[30-31]。而土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶在土壤碳、氮、磷循环中起着重要作用。综上所述,正是由于适宜的土壤环境使土壤微生物和酶的综合活力在节水栽培模式下比常规栽培模式下更强,导致土壤物质转化和循环速度比常规栽培模式下更快,促进了土壤的代谢作用,从而显著提高了土壤肥力。

本试验将水稻栽培模式与秸秆还田结合在一起研究,揭示出节水栽培模式下秸秆还田养分释放率更高、对土壤的培肥和生物学效应更强的规律,这是在前人研究基础上的更进一步,取得的研究结果能够为秸秆还田后水稻施肥和水管理提供一定的科学依据。常规水稻栽培模式下,插秧约 30 d 后经常采取排水晒田的措施来保持农田土壤的通透性,而此阶段正好是秸秆中养分释放的高峰期。这样势必会导致稻田水溶液中大量的养分随着水流进入环境,产生严重的环境污染。因此,我们建议秸秆还田与水稻栽培模式相结合,在实行秸秆还田后,水稻栽培模式宜采用节水灌溉栽培,其田间水管理的原则是根据水稻不同生育期对水分的需要,进行浅水灌溉,这样一则可以提高土壤微生物和酶活性,促进秸秆腐解和养分释放,进而提高秸秆还田的土壤培肥效应;二则减少稻田养分流失,防止农田面源污染;再则可以提高水分利用效率,为国家节约水资源。

4 结论

4.1 小麦秸秆还田后,在 0—30 d 腐解较快,后期腐解速率逐渐变慢。90 d 时累计腐解率达到了 48.9%—61.3%。秸秆中养分释放速率表现为 $K>P>N\approx C$ 。节水栽培模式下小麦秸秆腐解率和养分释放率均显著高于常规栽培。

4.2 小麦秸秆还田后,土壤微生物数量呈现“前期迅速增加,中期急剧减少,后期缓慢减少”的变化特征。土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的变化规律与微生物相似,而纤维素酶活性呈现“前期剧升、中期缓增、后期骤降”的变化趋势。节水栽培模式下土壤微生物数量和酶活性均显著高于常规栽培。适当增加秸秆用量可以提高微生物数量和酶活性,用量过高对细菌和放线菌数量有负效应。

4.3 小麦秸秆还田可显著提高土壤有机碳和养分含量。节水栽培模式下秸秆还田后土壤有机碳和养分含量的提高效应较常规栽培更显著。提高秸秆用量对土壤养分含量有显著的正效应。

References:

- [1] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil. *Biology Fertility of Soils*, 2002, 35(1):41-48.
- [2] Lao X R, Sun W H, Wang Z, Hao Y R, Zhang C A. Effect of mulching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):619-623.

- [3] Tan J S, Jin J Y, Huang S W, Li S T, He P. Effect of long-term application of k fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil k under different planting systems. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007,40(1):133-139.
- [4] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, Owens L B. Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 1128-1136.
- [5] Yadvinder S, Bijay S, Ladha J K, Khind C S, Khera T S, Bueno C S. Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America*, 2004, 68(3): 854-864.
- [6] Han L J, Yan Q J, Liu X Y, Hu J Y. Straw resources and their utilization in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002,18(3):87-91.
- [7] Zhang D X, Han Z Q, Liu W, Gao S G, Hou D J, Li G H, Chang L S. Biological effect of maize stalk return to field directly under different accretion decay conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005,11(6): 742-749.
- [8] Miller M, Dick R P. Thermal stability and activities of soil C enzymes as influenced by crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995,27(9): 1161-1166.
- [9] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R. Rice yield and nitrogen efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal*, 2000,92(6):1096-1103.
- [10] Zhou L K, Zhang Z M, Cao C M. On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 1983,20(4):413-418.
- [11] Chen W X. *Soil and environment microbiology*. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1990.
- [12] Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedologica Sinica*, 2002,39(1):89-96.
- [13] Smith J L, Paul E A. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochemistry*, 1991, 23:359-396.
- [14] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 453-461.
- [15] Kautz T, López Fandob C, Ellmer F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 278-285.
- [16] Ocio J A, Brookes P C, Jenkinson D S. Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic N. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(2): 171-176.
- [17] Liu B F, Lu M, Liu S W. Studies on no-water layer irrigating technique in rice. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2004, 10(6): 370-370.
- [18] Li Y K. *Conventional Soil Chemical Nutrient Analysis Techniques*. Beijing: Science Press, 1983.
- [19] Yao H Y, Huang C Y. *Edaphon Ecology and Experiment Technology*. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] Guan S Y. *Soil Enzyme and Research Method*. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [21] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Application and the determination method of soil microbial biomass. Beijing: Meteorological Press, 2006.
- [22] Christensen BT. Barley straw decomposition under field conditions; effect of placement and initial nitrogen content on weight loss and nitrogen dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 1986, 18(5):523-529.
- [23] Li F Y, Sun X F, Feng W Q, Qin Y S, Wang C Q, Tu S H. Nutrient release characteristic of different crop straws manure. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 374-380.
- [24] Dai Z G, Lu J W, Li X K, Lu M X, Yang W B, Gao X Z. Nutrient release characteristics of different crop straws manure *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272-276.
- [25] Shi Y, Jiang A Q, Dai C C, Lu L. Advanced in microbiological mechanism and application of straw degradation. *Journal of Microbiology*, 2002,22(1):47-50.
- [26] Chen D L, Yi Z X, Zhou W X, Tu N M. Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010,30(8): 1722-1728.
- [27] Xuo G W, Duan H, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effect of wheat residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 2(3):934-942.
- [28] Ren W J, Liu D Y, Wu J X, Wu J X, Chen D C, Yang W Y. Effects of returning straw to soil and different tillage methods on paddy field soil fertility and microbial population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 817-822.
- [29] Kandeler E, Tschirko D, Spiegel H. Long-term monitoring of a microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(4): 343-351.

- [30] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, Angers D A, Ellert B H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 1994, 74(4): 367-385.
- [31] Gregorich E G, Carter M R, Doran J W, Pankhurst C E, Dwyer L M. Biological attributes of soil quality // Gregorich E G, Carter M R, eds. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. The Netherlands: Elsevier, 1997: 81-113.

参考文献:

- [2] 劳秀荣,孙伟红,王真,郝艳如,张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. *土壤学报*,2003,40(4):619-623.
- [3] 谭德水,金继运,黄绍文,李书田,何萍. 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. *中国农业科学*,2007,40(1):133-139.
- [6] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,胡金有. 中国农作物秸秆资源及其利用现状. *农业工程学报*,2002,18(3):87-91.
- [7] 张电学,韩志卿,刘微,高书国,候东军,李国防,常连生. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究. *植物营养与肥料学报*,2005,11(6):742-749.
- [10] 周礼恺,张志明,曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用. *土壤学报*,1983,20(4):413-418.
- [11] 陈文新. *土壤和环境微生物学*. 北京:北京农业大学出版社,1990.
- [12] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. *土壤学报*,2002,39(1):89-96.
- [17] 刘佰方,陆敏,刘树文. 节水高产水稻无水层灌溉技术. *水利科技与经济*,2004,10(6):370-370.
- [18] 李西开. *土壤农业化学常规分析方法*. 北京:科学出版社,1983.
- [19] 姚槐应,黄昌勇. *土壤微生物生态学及其实验技术*. 北京:科学出版社,2006.
- [20] 关松荫. *土壤酶学研究方法*. 北京:农业出版社,1986.
- [21] 吴金水,林启美,黄巧云,肖和艾. *土壤微生物生物量测定方法及其应用*. 北京:气象出版社,2006.
- [23] 李逢雨,孙锡发,冯文强,秦鱼生,王昌全,涂仕华. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究. *植物营养与肥料学报*,2009,15(2):374-380.
- [24] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,鲁明星,杨文兵,高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. *农业工程学报*,2010,26(6):272-276.
- [25] 史央,蒋爱芹,戴传超,陆玲. 秸秆降解的微生物学机理研究及应用进展. *微生物学杂志*,2002,22(1):47-50.
- [26] 陈冬林,易镇邪,周文新,屠乃美. 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. *环境科学学报*,2010,30(8):1721-1728.
- [27] 徐国伟,段骅,王志琴,刘立军,杨建昌. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响. *中国农业科学*,2009,42(3):934-942.
- [28] 任万军,刘代银,吴锦秀,伍菊仙,陈德春,杨文钰. 免耕高留茬抛秧对稻田土壤肥力和微生物群落的影响. *应用生态学报*,2009,20(4):817-822.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元