

稻草及稻草循环利用后的废弃物还田效益研究

彭志红¹, 李明德^{1*}, 蔡立湘², 聂军¹, 廖育林¹, 刘琼峰¹

1. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院, 湖南 长沙 410125

摘要: 本文针对中南丘陵水稻产区农田稻草经过稻草直接还田(鲜稻草)、稻草过腹还田(新鲜牛粪)、稻草栽培食用菌后还田(新鲜菌渣)、稻草产沼气后还田(新鲜沼渣)等几种主要的循环利用方式后的废弃物还田, 结合化肥配施对水稻产量及土壤基本理化性状影响的研究, 以期寻找一种既能达到有机废弃物的循环再利用, 改善生态环境, 又能够改良土壤理化性状并达到水稻丰产的目的。试验结果显示: 相对于常规的化肥施用, 几种有机废弃物还田加化肥配施均有利于土壤有机质(1.71%~6.98%), 碱解氮(4.30%~15.05%), 有效磷(11.22%~21.43%)等养分的提高; 增加了土壤团聚体 $R_{0.25}$ (干筛 6.60%~8.74%, 湿筛 2.64%~45.06%)、平均质量直径(干筛 26.91%~52.69%, 湿筛 4.55%~32.73%)及几何平均直径(干筛 17.88%~35.56%, 湿筛 3.08%~6.15%); 在产量方面, 虽较常规施肥有所下降, 但经济效益却是增加的, 较常规施肥增收 75.6 元·hm⁻² 到 1 057.0 元·hm⁻², 其中沼渣还田的增益率最高达 8.59%。

关键词: 中南丘陵地区; 稻草; 有机废弃物; 循环利用; 土壤理化性状; 产量; 经济效益

中图分类号: X71

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0683-05

我国秸秆资源丰富(约6亿t·a⁻¹), 其中稻草约占秸秆总数的四分之一^[1], 而利用率很低, 约97%的秸秆被焚烧, 一方面严重污染了环境, 另一方面浪费了宝贵的生物资源, 导致土壤有机质大量损失^[2]。20世纪90年代以来, 我国粮食主产区的秸秆还田成为了秸秆利用的主要方式之一。一些学者对于秸秆还田技术^[3-4], 秸秆还田与化肥配施的增产效应^[5-6], 秸秆还田及对后熟作物产量、土壤肥力和环境影响^[7,8]的报道已有不少。但这些都是基于秸秆的直接还田的研究, 况且水沤法、堆沤法、石灰法等秸秆还田方法较费时费力^[4]。

当前, 各国已将农作物秸秆处理列为发展生态农业和农村可再生资源利用的重要战略之一, 采用适宜的技术有效开发利用农作物秸秆资源对可持续农业及农村经济的发展必将产生深远意义^[9]。因此本文基于此提出稻草经不同循环利用后的废弃物配以化肥还田, 即, 稻草过腹还田(新鲜牛粪)、稻草栽培食用菌后菌渣还田(新鲜菌渣)、稻草产沼气后沼渣还田(新鲜沼渣)等技术方法, 旨在开发适宜发展生态农业和农村可再生资源利用的丰产技术。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2008年7月至10月在湖南长沙县干杉乡长安村进行。供试土壤为第四纪红色粘土发育的红黄泥, 含有机质21.5 g·kg⁻¹, 碱解氮124 mg·kg⁻¹, 有

效磷13.4 mg·kg⁻¹, 速效钾47 mg·kg⁻¹, pH值5.2。供试水稻品种为岳优9113, 前作为早稻。试验设5个处理: ①常规施肥, ②稻草直接还田(鲜稻草6 250 kg·hm⁻²), ③稻草过腹还田(新鲜牛粪22 500 kg·hm⁻²), ④稻草栽培食用菌后菌渣还田(新鲜菌渣7 500 kg·hm⁻²), ⑤稻草产沼气后沼渣还田(新鲜沼渣22 500 kg·hm⁻²)。各处理所施N、P、K量相同, N-P₂O₅-K₂O的施用量为180.0-45.0-150.0 kg·hm⁻²。试验前取样分析稻草、牛粪、菌渣、沼渣中的N、P、K质量分数(见表1)。稻草直接还田、稻草过腹还田、菌渣还田、沼渣还田的处理的施肥量须分别扣除其中所含的N、P、K量。稻草、牛粪、菌渣、沼渣、磷肥作基肥一次施用; 氮肥: 50%作基肥, 40%作分蘖肥, 10%作穗肥; 钾肥: 50%作基肥, 50%作分蘖肥。其中, 稻草、牛粪、菌渣、沼渣都采用翻埋还田; 稻草翻埋还田时, 稻草切成20 cm左右; 移栽密度为20 cm×20 cm。试验采用随机区组排列,

表1 试验用稻草、牛粪、菌渣、沼渣中的水分、N、P、K质量分数(干基)

Table 1 The content of water and nutrients of rice straw, cow manure, mushroom culture medium and biogas pit sediment(dry basis)

名称	水分/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ /(g·kg ⁻¹)	K ₂ O/(g·kg ⁻¹)
鲜稻草	218	5.6	1.7	37.8
新鲜牛粪	374	23.3	26.7	24.1
新鲜菌渣	405	9.1	2.6	12.6
新鲜沼渣	421	9.7	17.4	6.4

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD89B11, 2008BADA/B01/)

作者简介: 彭志红(1966年生), 男, 副研究员, 本科, 主要从事土壤肥料方面的研究。

*通讯作者: 李明德(1964年生), 男, 研究员, 主要从事土壤肥料和土壤资源利用的研究。E-mail: limingde460@sohu.com

收稿日期: 2008-12-26

3次重复, 小区面积20 m²。

1.2 土壤样品的采集和测产

试验前取基础土样; 在水稻收获后每个处理取土壤样品, 测定土壤有机质、土壤养分、容重和土壤团粒结构。水稻收获时每个小区取考种样 (每个小区 5 点取样, 每点取 1 株), 调查其有效穗数, 实粒数, 结实率和千粒质量。每个小区单打, 单收, 单计产, 测定每个小区稻谷的实际产量。

1.3 测定项目及测定方法

土壤有机质: 采用重铬酸钾容量法; 碱解氮: 采用碱解扩散法; 有效磷: 盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法; 速效钾: 采用乙酸铵浸提-火焰光度法; 土壤 pH: 采用电位法 (水: 土 = 2.5 : 1); 土壤容重: 采用环刀法^[10]; 水稳性团粒结构测定及计算: 采用人工筛分法^[11]。

2 结果与分析

2.1 稻草不同循环途径的产物还田对土壤养分质量分数的影响

2.1.1 稻草不同循环途径的产物还田对土壤有机质质量分数的影响

土壤有机质是土壤中最活跃的成分, 是土壤肥力重要的物质基础, 也是评价土壤肥力高低的重要指标之一。它不仅含有各种营养元素, 而且还是土壤微生物生命活动的能源, 它在土壤物理调节作用中, 对土壤结构、耕性也有重要的影响。对土壤水肥气热等各种因素起着重要的调节作用。从本试验的结果看, 相对于常规施肥处理, 鲜稻草、新鲜牛粪、菌渣处理的土壤有机质质量分数都有所增加, 其中稻草还田处理的土壤有机质质量分数增加最大 (表2)。

表 2 晚稻收获后不同处理表层土壤(0~20 cm)养分质量分数的比较
Table 2 Comparison of nutrient contents in topsoil (0~20 cm) between treatments after late rice harvest

处理	有机质 /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)
常规施肥	17.8	97	9.8	42
鲜稻草	18.9	107	11.1	32
新鲜牛粪	18.8	106	10.9	35
新鲜菌渣	18.2	100	8.6	43
新鲜沼渣	17.8	97	11.9	35

2.1.2 稻草不同循环途径的产物还田对土壤速效氮、磷、钾质量分数的影响

土壤养分是土壤的重要组成部分, 各种营养元素, 成为土壤微生物生命活动的能源, 为土壤微生物提供丰富的营养物质, 激活酶的活性, 从而促进了土壤各种养分的有效转化。有效氮磷钾含量的多少直接影响作物对养分的吸收利用, 进而影响作物

的产量和品质。由表2可以看出, 稻草不同循环途径后的产物还田对土壤速效氮、磷、钾养分均有一定的影响, 鲜稻草、新鲜牛粪还田处理的土壤碱解氮质量分数较常规施肥有明显的提高; 除新鲜菌渣还田处理的土壤有效磷质量分数出现了下降的趋势外, 其它处理的土壤有效磷质量分数较常规施肥有明显的提高; 速效钾质量分数新鲜菌渣还田处理略高于常规施肥外, 其它处理均低于常规施肥。这主要与有机废弃物的养分含量有关。其次可能是由于稻草等有机废弃物中养分的分解转化需要一定的过程, 在短时间内对速效养分的供给能力不如矿物质化肥。

2.2 稻草不同循环途径的产物还田对土壤容重和团聚体的影响

2.2.1 稻草不同循环途径的产物还田对土壤容重的影响

土壤容重(土壤密度)是土壤的重要物理性质, 土壤容重综合反映了土壤颗粒和土壤孔隙的状况, 它们与土壤质地、土壤的结构、腐殖质含量及土壤松紧状况有关, 同时也影响着土壤中水、肥、气、热等肥力因素的变化与稳定性。从测定结果看, 虽然各处理间的容重无显著性差异, 但鲜稻草、牛粪、菌渣和沼渣还田有使土壤容重变小的趋势, 特别是菌渣和沼渣 (表3)。

表 3 晚稻收获后不同处理表层土壤容重的比较
Table 3 Comparison of soil bulk density in topsoil (0-20cm) between different treatments after late rice harvest

处理	容重/(g·cm ⁻³)
常规施肥	1.40a
鲜稻草	1.35a
新鲜牛粪	1.37a
新鲜菌渣	1.30a
新鲜沼渣	1.33a

2.2.2 稻草不同循环途径的产物还田对土壤团聚体的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是自然生态系统和人工管理生态系统的基本属性, 土壤结构因控制水分、气体通量和养分运移而影响土壤和生态系统功能^[12]。土壤团聚体具有环境和肥力双重功能, 维持和提高团聚体的稳定性可提高土壤碳汇功能, 减少温室气体排放, 协调土壤中的水、肥、气、热, 维持和稳定土壤疏松熟化层, 因此, 团聚体稳定性经常被作为土壤结构的指示因子^[13]。土壤团聚体的形成受物理、化学和生物因素的驱动, 主要胶结剂有土壤有机碳(SOC)、生物(植物根系、真菌菌丝和细菌等)、离子键桥、粘粒和碳酸盐, SOC与团

聚体的形成与稳定密切相关^[14]。

我们通常把 > 0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体，团粒结构是土壤中最好的结构体，其数量与土壤的肥力状况呈正相关^[15]。因此本研究采用 > 0.25 mm 团聚体的比例来说明土壤团聚体的数量变化，试图反映稻草不同循环后的产物还田后土壤的肥力和稳定性状况（表 4）。通过干筛法可以获得原状土壤中团聚体的总体数量，这些团聚体包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体。如表 4 所示，在干筛法中，新鲜的稻草、牛粪、菌渣、沼渣等处理的团粒结构均高于常规施肥处理。湿筛法获得的团聚体是土壤中的水稳性团聚体，水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的贡献，因而比非稳性团聚体更为重要，同理如表 4 所示，在湿筛法中，新鲜的稻草、牛粪、菌渣、沼渣等处理的水稳性团聚体也都高于常规施肥处理。

表 4 各处理干湿筛的 > 0.25 mm 团聚体含量、平均重量直径及几何平均直径

Table 4 Macroaggregate content, MWD and GMD by dry and wet sieving of different treatments

处理	干筛法			湿筛法		
	R _{0.25} [*]	MWD	GWD	R _{0.25} [*]	MWD	GWD
	/(g·kg ⁻¹)	/mm	/mm	/(g·kg ⁻¹)	/mm	/mm
常规施肥	879.9	4.46	5.09	265.2	1.10	0.65
鲜稻草	938.0	5.66	6.00	272.2	1.46	0.69
新鲜牛粪	944.1	6.71	6.57	384.7	1.10	0.63
新鲜菌渣	956.8	6.81	6.90	281.9	1.15	0.68
新鲜沼渣	954.5	6.28	6.42	290.4	1.30	0.67

不同粒级团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物运动具有不同的作用^[16-17]，因此在团聚体总量的基础上，团聚体大小分布状况与土壤的质量关系更加密切。*MWD* 和 *GMD* 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标。*MWD* 和 *GMD* 值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高，稳定性越强^[18]，如表 4 所示，无论在干筛法还是湿筛法中，新鲜的稻草、牛粪、菌渣、沼渣等处

理的 *MWD* 和 *GMD* 值都高于常规施肥处理。

2.3 稻草不同循环途径的产物还田对水稻产量及经济效益的影响

2.3.1 稻草不同循环途径的产物还田对水稻产量的影响

从表 5 可以看出，稻草不同循环途径的产物还田对构成水稻产量的各种因素影响中，能明显的提高水稻的结实率和千粒质量，而有效穗数和实粒数却低于常规施肥。主要是由于稻草等有机废弃物在还田初期需要经过微生物的腐解转化成有效养分，才能被水稻吸收利用，初期较低的有效养分含量，影响了水稻前期的分蘖，从而影响了有效穗数；但潜在的肥力以及可持续性的养分供应能力和效果，有助于水稻后期的生长发育，从而明显的提高了水稻的结实率和千粒质量。

表 5 不同处理水稻产量及构成因素的分析

Table 5 Analysis of rice yield and its forming factors under different treatments

处理	有效穗数 /(万穗·hm ⁻²)	实粒数 /(粒·穗 ⁻¹)	结实率 /%	千粒质量 /g	理论产量 /(kg·hm ⁻²)
常规施肥	405	69.1	70.3	25.06	7 139.0
鲜稻草	430	60.2	67.9	25.99	7 586.1
新鲜牛粪	325	64.8	72.8	26.55	6 279.1
新鲜菌渣	380	64.3	72.1	25.77	7 061.4
新鲜沼渣	365	66.3	76.4	26.61	7 420.5

2.3.2 稻草不同循环途径的产物还田的经济效益分析

由表 6 可以看出，除新鲜牛粪还田的處理的水稻产量与常规施肥处理的产量差异显著外，其它处理的水稻产量与常规施肥处理的产量差异都没有达到显著水平。而对于各处理中化肥的配施投入成本，常规施肥远远高于其余处理，从而明显看出常规施肥的实际收入也相应的低于其余几种处理。因此与其余处理的产出和投入相比常规施肥最小，相对增益率（其余处理相对于常规施肥）均大于零，一季水稻的收入较常规施肥增收 75.6 元·hm⁻² 到

表 6 不同处理水稻产量和经济效益分析

Table 6 Analysis of rice yield and economic benefit of different treatments

处理	实际产量 /(kg·hm ⁻²)	总收入 /(元·hm ⁻²)	投入成本 /(元·hm ⁻²)	实际收入 /(元·hm ⁻²)	产投比	增加收入 /(元·hm ⁻²)	相对增益率* /%
常规施肥	7 746.7 a	14 873.6	2 567	12 306.6	5.79	—	—
鲜稻草	7 296.7 ab	14 009.6	1 107	12 902.6	12.66	596.0	4.84
新鲜牛粪	6 938.3 b	13 321.6	0	13 321.6	—	1 015.0	8.25
新鲜菌渣	7 385.0 ab	14 179.2	1 797	12 382.2	7.89	75.6	0.61
新鲜沼渣	7 421.7 a	14 249.6	886	13 363.6	16.08	1057.0	8.59

注：1. 稻谷价格以 1.92 元·kg⁻¹ 计算；2. 投入成本是指化肥费用的投入；3. 实际收入=总收入-投入成本。

*：鲜稻草，新鲜牛粪，新鲜菌渣，新鲜沼渣处理相对于常规施肥处理的实际收入的增加量百分比，即，相对增益率 = (M_i - M₀) / M₀ × 100，M_i：第 i 个处理的实际收入（i：鲜稻草，新鲜牛粪，新鲜菌渣，新鲜沼渣），M₀：常规施肥的实际收入。

1 057.0 元·hm⁻²。且新鲜沼渣>新鲜牛粪>鲜稻草>新鲜菌渣,说明新鲜沼渣产生了最好的受益效果,其相对增益率高达8.59%。

2.3.3 生态效益分析

环境污染问题已成为当前威胁人类健康和生存的焦点,其中农业污染也已越来越受到重视。根据国内研究结果的汇总,我国农田施用的氮肥中,当季作物的吸收利用率约为35%,在高产高肥地区可能低于25%,而通过各种途径所损失的总氮量约占50%,化肥氮的径流、淋洗和氨挥发三者之和视作农田化肥氮的损失对水体氮素面源污染的贡献^[19]。另外,人类的生活和生产所产生的有机废弃物中绝大部分的氮、磷直接进入地表水,甚至已远多于化肥自农田通过径流排入地表水的氮磷量,也成为重要的污染源^[20]。因此,改进施用技术,通过降低施入农田的氮肥来降低氮损失率以及将有机废弃物还田来提高作物的吸收利用率具有相当大的潜力。这是协调农业发展与环境保护的根本要求,因而成为国内外有关学者长期研究的热点。

在我们的试验中由于施入了有机废弃物,而使化肥N、P₂O₅、K₂O的施入量分别减少27.5~180.0 kg·hm⁻²、8.5~45.0 kg·hm⁻²、57.0~150.0 kg·hm⁻²,转移、利用、处理有机废弃物6 250~22 500 kg·hm⁻²。因此,稻草及其循环后的有机废弃物还田加无机化肥的配施,不仅使农民增加收益,相对于常规施肥,还有利于减少化肥的农业污染,对有机废弃物的转移利用,还可从根本上遏制秸秆焚烧污染环境、堵塞河道的现象。且充分利用大量的秸秆资源,提高秸秆利用率,保护农业生态环境,保障农业可持续发展的社会效益是显著的。本项技术结果的推广,将对促进农村生态环境保护和优化城乡环境将会发挥积极作用。

3 结论

秸秆还田,稻草还田的研究已经有很多,很多专家提出了很好的技术与方法,也讨论了经济效益的情况,本技术的优势在于:(1)在改善土壤养分方面,稻草经几种循环方式后还田配施化肥的处理对土壤中有机质较常规施肥有所提高,也增加了氮磷钾等速效养分持续肥效;(2)在改善土壤物理性状方面,稻草经几种循环方式后还田配施化肥处理的土壤团聚体中>0.25 mm团聚体含量、平均重量直径及几何平均直径均较常规施肥提高,团聚体稳定性增强;(3)在产量效益方面,虽然稻草经几种循环方式后还田配施化肥处理的水稻单位面积产量较常规施肥的有所下降,但是在净利润上均较常规施肥增加,达到75.6元·hm⁻²到1 057.0元·hm⁻²的增收效果。其中沼渣还田的增益率最高达8.59%;

(4)在生态效益方面,既减少了化肥氮的施入量(60~390 kg·hm⁻²),又有效地对有机废弃物(6 250~22 500 kg·hm⁻²)进行了转移、利用,减少了化肥流失造成的面源污染,有利于生态效益的增加。

参考文献:

- [1] 李国学, 张福锁. 固体废弃物堆肥化和有机复混肥的生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 65-88.
LI Guoxue, ZHANG Fusuo. Solid Waste Compost and Organic Fertilizer Production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 65-88.
- [2] STEWART B W, CAESAR-TONTHAT T C, SARA F W, et al. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 84: 154-167.
- [3] 杨玉爱. 我国有机肥料研究及展望[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 414-422.
YANG Yuai. Perspectives of organic fertilizer research in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 414-422.
- [4] 江添茂, 黄燕翔, 郭丽芳, 等. 稻草不同还田方法的比较试验[J]. 土壤肥料, 2003, (2): 42-43.
JIANG Tianmao, HUANG Yanxiang, GUO Lifang, et al. Comparison test of different methods of straw recycling[J]. Soils and Fertilizers, 2003, (2): 42-43.
- [5] 郑兰君, 曾广永, 王鹏飞. 有机肥、化肥长期配合施用对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2001, 17(3): 48-50.
ZHENG Lanjun, ZENG Guangyong, WANG Pengfei. Effects on rice yield and soil nutrients with long-term use of chemical fertilizers and organic fertilizer[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001, 17(3): 48-50.
- [6] 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 Xiurong, SUN Weihong, WANG Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 618-623.
- [7] 周江明, 徐大连, 薛才余. 稻草还田综合效益研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(4): 7-10.
ZHOU Jianming, XU Dalian, XUE Caiyu. Study of comprehensive utilization efficiency of returning rice straw to field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(4): 7-10.
- [8] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214-218.
YANG Zhichen, LY Yizhong, ZHANG Fengrong, et al. Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 214-218.
- [9] 张庆玲. 水稻秸秆还田现状与分析[J]. 农机化研究, 2006, (8): 223.
ZHANG Qingling. Analysis and the status of straw recycling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, (8): 223.
- [10] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2006: 148-152.
DU Sen, GAO Xiangzhao. Soil Analysis of Technical Specifications [M]. Second edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2006: 148-152.
- [11] Klute A. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical

- Methods[M]. 2nd ed. Madison, WI: Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, 1986: 425-442.
- [12] MENDHAM D S, O'CONNELL A M, GROVE T S. Change in soil carbon after land clearing or afforestation in highly weathered lateritic and sandy soils of south-western Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 95: 143-156.
- [13] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367-1377.
- [14] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [15] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1042-1049.
- [16] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 18-25.
- CHEN Enfeng, ZHOU Likai, WU Guanyun. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 18-25.
- [17] DEXTER A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11: 199-238.
- [18] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of the soil be characterized by size of the weight distribution[J]. *Chinese Science Bulletin*. 1993, 38(20): 1896-1899.
- [19] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroeco. Systems*, 2002, 63: 117-127.
- [20] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J]. *中国科学(B 辑)*, 2001, 31(2): 130-137.
- XING Guangxi, CAO Yacheng, SHI Shulian, et al. The sources of pollution and denitrification of water nitrogen in Taihu-Lake Area in China[J]. *Science in China(Series B)*, 2001, 31(2): 130-137.

Effect of rice straw and the residues of rice straw recycling on soil fertility and crop yield

Peng Zhihong¹, Li Mingde^{1*}, Cai Lixiang², Nie Jun¹, Liao Yulin¹, Liu Qiongfang¹

1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2. Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China

Abstract: Rice straw is an important organic resource to be used for animal food, mushroom culture medium and methane generating material. In this study, we investigated the effects of the residues from above rice straw recycling activities and fresh rice straw on soil physical and chemical properties, nutrient status and crop yield. The results showed that, in comparison with chemical fertilization, application of rice straw and the residues of recycling rice straw increased the content SOM, soil available nitrogen, soil available phosphorus and macro-aggregate ($R_{0.25}$). It also caused the increase of the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates. Although crop yield slightly decreased under such conditions, the economic benefit was obvious which was between 75.6 and 1057.0 yuan·hm⁻² among the treatments while the highest benefit rate was 8.59% which occurred in the treatment of the residue from biogas producing pool.

Key words: hilly areas of central south; rice straw; organic residue; recycling; soil physical and chemical properties; crop yield; economic benefit