

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201610036

引文格式: 胡钧铭, 夏旭, 张野, 等. 快腐蚕沙对水稻生境及安全生长的影响 [J]. 广西植物, 2017, 37(8):993-999

HU JM, XIA X, ZHANG Y, et al. Effects of silkworm excrement fast-rotting on rice habitat and security growth [J]. Guihaia, 2017, 37(8):993-999

快腐蚕沙对水稻生境及安全生长的影响

胡钧铭^{1,2,3*}, 夏旭², 张野¹, 李婷婷¹, 陆冰梅⁴,
吕相沛^{1,3}, 何丹^{1,3}, 韦翔华³, 何铁光¹, 李忠义¹

(1. 广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081;
3. 广西大学 农学院, 南宁 530004; 4. 象州中平镇农业技术推广站, 广西 象州 545807)

摘要: 为了实现快腐蚕沙水稻安全生长与营养生态利用, 该研究采用自主研发的蚕沙生物专用促腐剂, 对蚕沙废弃物进行田间堆肥快腐处理, 将处理后的蚕沙有机肥作为水稻基肥和分蘖肥施用, 研究蚕沙快腐有机肥对水稻生态环境及安全生长的影响。结果表明: 应用蚕沙生物促腐剂处理后的蚕沙废弃物堆体温度上升迅速, 能将产生恶臭有机物降解或转化为抗氧化物。堆体温度显示, 前 10 d 中有 5 d 温度保持在 60 °C 以上, 腐熟进程快, 能有效抑制有害微生物生长, 杀灭蚕沙病源微生物。蚕沙快腐后安全检测显示, 大肠杆菌呈下降趋势, 快腐 4~5 d 后臭味消除。稻田施用后, 水稻分蘖期叶片叶绿素含量比对照高 30.9%, 硝酸还原酶活性提高 48.9%, 根系活力增加 21.3%, 根干物质增加 26.5%。稻谷增产 10.8%~22.9%, 稻田土壤通透性增强。该研究结果表明快腐蚕沙能促进水稻的安全生长与营养健康利用, 且应用效果良好。

关键词: 蚕沙, 快腐, 水稻, 生境, 利用

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)08-0993-07

Effects of silkworm excrement fast-rotting on rice habitat and security growth

HU Jun-Ming^{1,2,3*}, XIA Xu², ZHANG Ye¹, LI Ting-Ting¹, LU Bing-Mei⁴,
LÜ Xiang-Pei^{1,3}, HE Dan^{1,3}, WEI Xiang-Hua³, HE Tie-Guang¹, LI Zhong-Yi¹

(1. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;
2. Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100081, China; 3. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530005, China; 4. Station for Popularizing Agricultural Technique Extension Service of Zhongpin Town in Xiangzhou County, Xiangzhou 545807, Guangxi, China)

收稿日期: 2016-11-23 修回日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(41661074); 农业部农业环境重点实验室开放基金(KLAE201504, KLAE201407); 广西科技攻关计划项目(桂科重 14121002-4-6); 生态广西建设引导资金项目(桂财政函[2015]87); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2014YZ31); 来宾市科技攻关项目(来科攻 143608) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41661074); Open Fund of Key Laboratory for Agricultural Environment(KLAE201504, KLAE201407); Guangxi Key Program of Science and Technology (14121002-4-6); Ecological Guangxi Construction Guide Capital Program([2015]87); Foundamental Research Fund of Guangxi Academy of Agricultural Sciences(2014YZ31); Key Program of Science and Technology in Laibin City (143608)].

作者简介: 胡钧铭(1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业有机资源利用与生境调控研究, (E-mail)jmhu06@126.com。

* 通信作者

Abstract: In this study, the self-developed silkworm excrement deodorant special preservative was used and the silkworm excrement was treated by field composting in order to realize safely silkworm excrement quick safety decomposing and utilization of cleaner fertilizer in paddy field and ecological nutrient of rice growth. The treated silkworm excrement organic fertilizer was applied as rice base fertilizer and tillering fertilizer for the study on rice habitat and security growth under excrement fast-rotting. The results showed that the temperature of the compost after the silkworm excrement transformation promoter was increased rapidly, and could convert stinky organics degradation or conversion into antioxidants. The heater temperature showed that the temperature of 5 d during the treating 10 d could maintain above 60 °C. Rapid decomposition process, could effectively inhibit the growth of harmful microorganisms and kill pathogenic microorganisms silkworm excrement. After the quick-rot, we conducted a safety test, the *Escherichia coli* showed a descending trend. The odor eliminated after 4–5 d silkworm excrement fast rot. After application of this fertilizer to paddy fields, leaf chlorophyll content was 30.9% higher at the tillering stage, nitrate reductase activity increased by 48.9%, root activity increased by 21.3%, dry matter increased by 26.5%. Paddy yield increased 10.8%–22.9% and paddy soil permeability increased. Silkworm excrement fast-rotting to promote security growth and health utilization of rice growth is a safe, ecological, and healthy method, and the application effect is good.

Key words: silkworm excrement, fast-rotting, rice, habitat, utilization

水稻是重要的主粮作物,稻作可持续发展既影响粮食安全又影响食品安全。我国现代稻作产量伴随化肥、农药、除草剂的应用得到快速提高,随着长期现代化学技术的不断应用,农田板结、土壤酸化、重金属污染、面源污染、大气污染等环境问题不容忽视,稻作可持续发展问题日益突出,探索区域性稻作绿色安全生产技术越发显得重要而迫切。广西自承建东桑西移工程以来,桑蚕产业发展迅猛,形成了桂南、桂中、桂西北三大优势蚕业产业带,桑园面积和蚕茧产量多年稳居全国第一。蚕沙废弃物是养蚕过程中生产的一种重要的有机废弃物,由蚕的固体粪便、食剩的残桑以及蚕座中垫料组成(高云超等,2011)。由于对蚕沙认识不足,蚕沙引发的环境污染日趋突出,蚕沙如不进行有效处理极易造成病害传播、增加环境污染风险,对农村生产和生活环境造成严重的负面影响。

蚕沙中存在的中肠型脓病多角体、卒倒菌、微孢子孢子等病原物(杨琼等,2014),会给细菌、病毒滋生及保存提供生存环境,引起蚕体感染病害,蚕农把未经处理的蚕沙直接洒入桑园使用可能污染桑叶,病原沿食物链进入蚕体引起感染和发病,给桑蚕业带来致命打击。露天随意放置的蚕沙中富含的有机物和氮磷等营养元素以及某些残留药物,会随着雨水流入河流、农田,导致水体富营养化,造成地下水中硝基氮、硬度、细菌总数超标,危害人体

健康(陈晓萍,2011)。蚕沙富含高蛋白,自带挥发性脂肪酸、吡啶乙酸和酚类、氨和挥发性含硫化合物,是氨气、硫化氢、甲硫醇、甲基硫等恶臭或有毒气体产生的严重污染源之一,不仅臭味难以消除,对人体和牲畜都有不同程度危害。蚕沙废弃物污染问题一直困扰和制约着桑蚕业的发展,已成为蚕桑业发展的“瓶颈”(Han et al,2013)。

蚕沙有机质含量高,富含氮、磷、钾等多种矿物质营养元素,完全可以在加入一些农业秸秆、残渣废弃物作为辅料,经过发酵生产成优质肥料。但目前蚕农养殖呈个体独立分散细碎化,难以大量收集蚕沙原料,造成有机肥原料成本高,加工造粒、物流成本也导致商品蚕沙有机肥远高于普通化肥,农民不愿意购买和使用蚕沙制成的有机肥。国际范围内农业废弃物处理的根本途径在于资源化、本地化还田利用(Dobbs et al,2010; Matteo et al, 2013)。本研究利用自主筛选研发的蚕沙专用生物促腐剂,经田间快腐安全处理,将蚕沙有机肥作为水稻基肥和分蘖肥施用稻田,研究蚕沙有机肥对水稻生态环境及安全生长的影响,旨在为快腐蚕沙应用及区域性稻作绿色安全生态技术提供理论和实践依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

促腐剂为广西农业科学院农业资源与环境研

究所自主筛选研发的蚕沙专用生物促腐剂,该促腐剂针对蚕沙纤维素和蛋白酶特性,由光合菌、乳酸菌、酵母菌、放线菌为主导的复合微生物活性功能菌群和营养载体组成,分粉剂型和水剂型,其中活性光合菌 20%~25%、乳酸菌 15%~20%、酵母菌 22%~25%、放线菌 5%~10%、芽孢杆菌 3%~5%、双歧杆菌 1%~2%、高温菌 5%~10%。粉剂型营养载体构成为米糠 50%~55%、花生壳 8%~10%、麦麸 8%~10%、碳酸型矿物质 15%~20%、磷酸型促进剂 2%~3%、糖蜜 10%~15%。水剂型构成为大米淀粉 8%~10%、糖蜜 15%~20%、矿物质 4%~5%、维生素 1%~2%、微生物代谢物 25%~30%、水 20%~30%。

1.2 试验设计

1.2.1 蚕沙废弃物快腐处理 水稻移栽前 10~15 d,选择晴天,将收集后的蚕沙废弃物运至水稻田间地头。以蚕沙废弃物的质量总量计,先加入辅料 8‰~12‰米糠、1‰~2‰生石灰均匀混合。按照 20~25 cm 厚度平铺地面,均匀撒入 3‰~5‰蚕沙生物促腐粉剂,每吨蚕沙废弃物中加入 1~1.5 L 蚕沙生物促腐剂原液,然后按 1:200~300 均匀喷洒在蚕沙废弃物受体表面,撒水至手紧握有水被挤出,平放于手中没有水自然流出为准,持水量 50%~60%,按照 50~60 cm 堆放覆膜封闭腐熟 10~15 d,一次性腐熟完成,中间不翻堆,同步设置不添加蚕沙生物促腐剂为对照处理。

1.2.2 稻田应用试验设计 2014—2015 年进行蚕沙快腐有机肥稻田应用试验,其中象州百丈设早稻大田对比(450 kg/666.7 m²)试验,象州中平设晚稻大田对比(450 kg/666.7 m²)和梯度试验(0 kg/666.7 m²、150 kg/666.7 m²、300 kg/666.7 m²、450 kg/666.7 m²),南宁设早稻盘栽对比(450 kg/666.7 m²)试验,蚕沙快腐有机肥分水稻基肥和分蘖肥二次施用,各占 50%,盘栽与大田保持同步施肥水平。水稻品种为常规稻,象州百丈品种为力源占、象州中平为百香 139、南宁为桂育 9 号,大田设 3 重复,每小区面积为 30 m²,随机排列。小区采用田埂高 30 cm、宽 20 cm,塑料薄膜覆盖田埂,薄膜深入地下 20 cm。水稻采用托盘育秧,3~3.5 叶龄时人工插秧,每穴 3 苗,管理同其它优质稻大田生产。

1.3 取样及分析方法

蚕沙堆体温度采用刺入式温度计,每天在早上

9:00、下午 16:00 时插入堆体中央位置先测定堆体温度,然后求平均值。蚕沙快腐样品和稻田土壤微生物含量按常规方法取土壤样本进行细菌、放线菌和真菌微生物检测,采用微生物培养法,细菌培养基为牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌培养基为高氏一号培养基,真菌培养基为马丁培养基,均采用稀释平板法计数(袁丽红,2010)。有机质:水合热重铬酸钾氧化—比色法(鲁如坤,2000;鲍士旦,2005);全氮:GB 7173-87;全磷:GB 9837-88;全钾:GB 9836-88;速效氮:《土壤分析技术规范》中的碱解扩散法;速效磷:NY/T 148-1990;速效钾:《土壤分析技术规范》中乙酸铵提取—火焰光度法;pH:常规测量方法;容重、孔隙度:环刀法。水稻分蘖期叶片叶绿素活性、硝酸还原酶活性、根系活力采用邹琦法(邹琦,2004)。

试验数据在 Excel 中进行计算并作图。

2 结果与分析

2.1 蚕沙废弃物快腐后气味感官评估

蚕沙废弃物经田间快腐处理后,4~5 d 后就明显没有臭味,而对照没有生物促腐剂的 10 d 后仍有臭味(表 1)。说明蚕沙快腐促腐剂能够利用微生物间共生及协同作用,将蚕沙有机物降解或转化为抗氧化物,抑制有害微生物生长。

2.2 蚕沙废弃物快腐温度变化

田间快腐试验堆体温度变化显示,蚕沙废弃物快腐后效果比对照更好,温度上升迅速(图 1),添加蚕沙生物促腐剂处理后第 3 天就在 55 ℃ 以上,前 10 d 中有 5 d 温度保持在 60 ℃ 以上,有利于杀灭致病菌,促进蚕沙物质转化,增加腐熟度,物料可见白色菌丝状。

2.3 蚕沙废弃物快腐养分变化

2015 年象州中平蚕沙废弃物快腐发酵前后养分测定(表 2),除总氮含量下降外,全磷、全钾及有机质含量均增加,全磷含量增加了 23.2%,全钾含量增加了 8.58%,有机质含量增加了 10.64%,说明蚕沙废弃物田间快腐模式腐熟进程良好。

2.4 蚕沙废弃物快腐后微生物变化

对 2014 年蚕沙快腐材料的细菌、放线菌和真菌进行检测。结果显示,细菌、放线菌和真菌等微生物数量呈下降趋势,细菌是优势菌群,对发酵温度提升

表 1 蚕沙废弃物快腐后气味变化

Table 1 Odor change after silkworm excrement waste fast-rotting

年份 Year	处理 Treatment	蚕沙废弃物快腐后天数 Days of silkworm excrement waste fast-rotting (d)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2014	CK	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	+	+
	FR	+++	++	++	+	-	-	-	-	-	-
2015	CK	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	+	+
	FR	+++	++	+	-	-	-	-	-	-	-

注: 感官评估标准 -无臭, +微臭, ++较臭, +++很臭, **CK**. 对照, 未加促腐剂; **FR**. 快腐。下同。

Note: Sensory organs for the evaluation of standard. - odorless, + slight odor, ++ more odor, +++ special odor; **CK**. Control; **FR**. Fast-rotting. The same below.

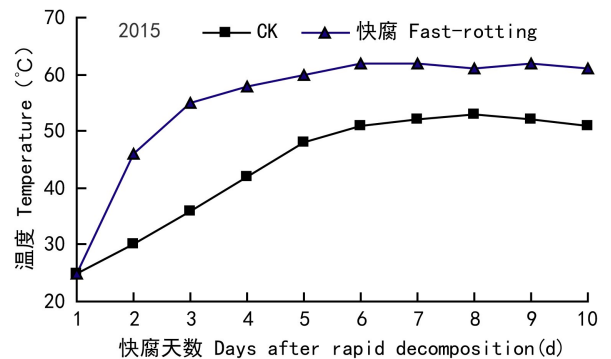
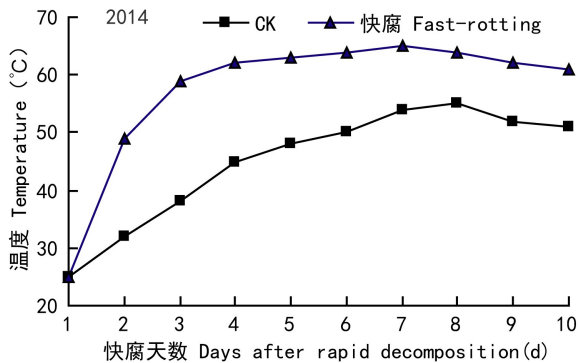


图 1 蚕沙废弃物快腐后温度变化

Fig. 1 Change of temperature after silkworm excrement waste fast-rotting

表 2 蚕沙废弃物快腐后养分变化 (单位: $g \cdot kg^{-1}$)Table 2 Change of nutrient content after silkworm excrement waste fast-rotting (Unit: $g \cdot kg^{-1}$)

处理 Treatment	总氮 Total nitrogen (N)		全磷 Total phosphorus (P_2O_5)		全钾 Total potassium (K_2O)		有机质 Organic matter	
	快腐前 Before fast-rotting	快腐后 After fast-rotting	快腐前 Before fast-rotting	快腐后 After fast-rotting	快腐前 Before fast-rotting	快腐后 After fast-rotting	快腐前 Before fast-rotting	快腐后 After fast-rotting
CK	24.2	22.8	18.8	21.1	31.2	33.5	493.1	535.6
FR	23.8	19.2	19.3	23.2	32.6	35.4	494.2	546.8

表 3 蚕沙废弃物快腐后微生物变化 (单位: $\lg\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)Table 3 Changes of microorganism after silkworm excrement waste fast-rotting (Unit: $\lg\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)

采样时间 Sampling time (d)	细菌 Bacteria		放线菌 Actinomycetes		真菌 Fungi		大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	
	CK	FR	CK	FR	CK	FR	CK	FR
0	13.58	13.96	10.25	10.49	9.36	9.65	8.21	7.82
3	11.21	12.72	10.62	11.58	9.02	8.85	7.42	6.91
6	9.56	10.21	10.85	11.35	8.34	8.02	5.86	2.8
9	8.95	9.25	10.68	11.26	7.85	7.25	3.01	1.12

注: 表 3 中数字是微生物总数(个· g^{-1})对数值。

Note: Figures in the table are the logarithm values for the total amounts of microorganisms($\text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$).

表 4 施用蚕沙有机肥水稻分蘖期叶片和根系性状

Table 4 Leaf and root characters during the application of organic fertilizer from silkworm excrement at rice tillering stage

处理 Treatment	叶片 Leaf		根系 Root	
	叶绿素 活性 Chlorophyll activity ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	硝酸还原 酶活性 Nitrate reductase activity ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	活力 Activity ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	根干重 Dry matter ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
CK	1.951	0.829	27.71	25.8
FR	2.826	1.625	35.23	45.1

表 5 水稻收获期主要农艺性状与增产效果

Table 5 Agronomic characters and stimulation effect in rice harvest period

处理 Treatment	有效穗 (个/穴) Effective panicle (No./Hole)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1 000-grain weight (g)	产量 Yield ($\text{kg}/666.7 \text{ m}^2$)
CK	7.32	93.2	19.6	306.7
FR I	7.82	90.34	20.9	343.9
FR II	9.54	88.89	21.5	375.6
FR III	10.25	80.21	21.6	397.8

注: 施用蚕沙有机肥。CK. 0 kg; FR I. 150 kg; FR II. 300 kg; FR III. 450 kg。

Note: Application of organic fertilizer from silkworm excrement. CK. 0 kg; FR I. 150 kg; FR II. 300 kg; FR III. 450 kg.

有较大作用。大肠杆菌数量亦呈下降趋势,在快腐结束时显示每克仅有 1.12 g 大肠杆菌(表 3),符合 GB 7959 粪便无害化卫生要求。

2.5 水稻主要农艺性状与增产效果

蚕沙快腐有机肥盘栽试验中,水稻分蘖期叶绿素含量比对照高 30.9%,硝酸还原酶活性比对照高 48.9%,根系活力比对照增加 21.3%,根系干物质增加 26.5%(表 4)。施用快腐蚕沙有机肥的水稻返青期秧苗转色快,叶色浓绿,秧苗长势好,白根增多,表明施用快腐蚕沙有机肥促进了水稻生长。

2015 年下半年,象州蚕沙快腐有机肥水稻田间梯度试验表明,水稻后期转色青枝腊秆,有效穗、结实率、千粒重提高,抗性增强,增产稻谷 10.8%~22.9%(表 5),蚕沙快腐有机肥促进了水稻增产,蚕沙有机肥通过水体、土壤及水稻植株多重净化和吸收处理,就地实现蚕沙废弃物安全利用。

2.6 施用蚕沙有机肥后水稻主要生育期内土壤微生物变化

土壤微生物是稻田生态系统的重要组成部分,对 2015 年象州稻田施用蚕沙有机肥后水稻分蘖、成熟期的土壤微生物检测,结果显示土壤微生物数量均表现出细菌多,真菌少,并且细菌数量的变化幅度大于放线菌和真菌,生育期内土壤微生物呈现上升趋势(表 6)。

2.7 蚕沙快腐对稻田土壤结构影响

2014-2015 年施用蚕沙快腐有机肥,稻田土壤容重降低,孔隙度增加(表 7), >0.25 团聚体比例占优势,施用蚕沙有机肥有利于改善稻田土壤物理性

表 6 水稻主要生育期内土壤微生物变化

Table 6 Changes of soil microorganism during the rice main stage

采样 Sampling	细菌 ($\times 10^7$) Bacteria		放线菌 ($\times 10^4$) Actinomycetes		真菌 ($\times 10^3$) Fungi	
	CK	FR	CK	FR	CK	FR
分蘖期 Tillering	1.321	1.216	0.825	1.962	0.141	0.308
成熟期 Maturity	2.136	2.045	1.059	2.315	0.894	2.316

表 7 水稻收获期土壤结构特征

Table 7 Structural characteristics of soil in rice harvest period

年份 Year	处理 Treatment	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	通气孔 隙度 Aeration porosity (%)	>0.25 团聚体比例 >0.25 Proportions of aggregates (%)
2014	CK	1.317	43.256	1.452	88.96
	FR	1.228	45.621	1.626	92.45
2015	CK	1.375	42.164	1.326	89.68
	FR	1.165	46.265	1.684	94.12

状,提高土壤通气性,有利于形成疏松土壤形成,提高稻田土壤保水保肥能力。

3 讨论

采用自主研发的蚕沙除臭生物专用促腐剂,通过微生物前端处理,对蚕沙废弃物进行田间堆肥快腐处理。研究结果显示,应用蚕沙生物促腐剂处理后的蚕沙废弃物堆体温度上升迅速,前 10 d 中有 5 d 温度保持在 60 ℃ 以上,腐熟进程快,在厌氧好氧结合的条件下,能有效抑制有害微生物生长,杀灭蚕沙病原微生物,快腐安全检测显示,大肠杆菌呈下降趋势,4~5 d 后蚕沙废弃物臭味消除,说明蚕沙除臭生物专用促腐剂能将生产恶臭有机物降解或转化为抗氧化物,这为实现蚕沙废弃物安全快腐提供重要依据。

蚕沙快腐有机肥作为水稻基肥和分蘖肥施用,水稻分蘖期叶绿素含量上升,白根增加,干物质增多,根系活力增加,稻谷增产 10.8%~22.9%。水稻施用快腐蚕沙后,水稻分蘖期叶片叶绿素含量增加,硝酸还原酶活性提高、根系干物质增加、活力增加。土壤微生物是稻田生态系统的重要组成部分,水稻生育期内土壤微生物呈现上升趋势,可能微生物促进蚕沙在土壤里有机质转化,稻田土壤通透性得到增强,达到改土培肥,提高了地力。快腐蚕沙有机肥桑园应用的土壤经具有蚕桑微粒子病原鉴定资质的广西壮族自治区蚕种治疗检验检疫站检测未发现孢子。快腐蚕沙微生物处理后通过稻田水体、土壤及水稻植株多重净化和吸收处理,实现蚕沙废弃物安全利用,既切断了蚕沙细菌传播途径,又消减了蚕沙对蚕区和蚕业养殖的污染和破坏作用,对于解决农田化肥引发的土壤板结和农田面源污染具有重要的支撑作用。

蚕沙快腐及稻田清洁利用,蚕沙有机资源得到合理化利用。实现了蚕沙有机资源就近清洁处理、就近还田利用,有效降低了蚕沙废弃物异地收集运输加工有机肥处理和运力成本,避免造成异常二次污染风险,为了蚕沙引发的农村环境污染和资源浪费问题提供了一种安全快速的重要解决措施。应用实践证明,蚕沙稻田清洁安全利用是一种环保、生态、快速清洁处理技术,易于被蚕农和水稻种植户接受和推广,拓展了蚕沙清洁安全利用途径,为快腐蚕沙应用及区域性绿色稻作可持续发展提供了理论和实践依据。

4 结论

水稻施用蚕沙快腐有机肥后,水稻分蘖期叶片叶绿素含量增加、硝酸还原酶活性提高、根系干物质增加、活力增加,快腐蚕沙有机肥增强了稻田土壤通透性,促进了水稻安全生长与营养生态健康利用,缓解了现代稻作高复种指数下土壤结构问题,应用效果良好。

参考文献:

CHEN XF, LI ZP, LIU M, et al, 2013. Effects of different fer-

- tilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Sci Agric Sin*, 46(5): 950-960. [陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等, 2013. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响 [J]. *中国农业科学*, 46(5): 950-960.]
- CHEN XP, XIE YJ, LUO GE, et al, 2011. Silkmorm excrement organic fertilizer its nutrient properties and application effect [J]. *Chin J Appl Ecol*, 22(7): 1803-1809. [陈晓萍, 谢亚军, 罗光恩, 等, 2011. 蚕沙有机肥的养分特性及其肥效 [J]. *应用生态学报*, 22(7): 1803-1809.]
- DONG LL, LI XP, JIANG X, et al, 2014. Assessment of energy consumption and carbon footprint of rice production using life cycle assessment method: case study in Chongming Island, Shanghai, China. [J]. *J Agro-Environ Sci*, 33(6): 1254-1260. [董珑丽, 李小平, 姜雪, 等, 2014. 上海崇明岛水稻生产能耗与碳足迹生命周期评价 [J]. *农业环境科学学报*, 33(6): 1254-1260.]
- DU W, JIANG P, ZHOU J, et al, 2014. Effects of *Beauveria bassiana* and acephate on rice antioxidant status and soil nitrogen circulation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 22(2): 165-170. [杜威, 江萍, 周骏, 等, 2014. 白僵菌和乙酰甲胺磷对水稻抗氧化状态及土壤氮循环的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 22(2): 165-170.]
- FENG JF, LI FB, WU DX, et al, 2014. Effects of rice cropping systems on the restoration of aquaculture pond eutrophication and its prospective application [J]. *Acta Ecol Sin*, 34(16): 4480-4487. [冯金飞, 李凤博, 吴殿星, 等, 2014. 稻作系统对淡水养殖池塘富营养化的修复效应及应用前景 [J]. *生态学报*, 34(16): 4480-4487.]
- HOU YP, HAN LG, KONG LL, et al, 2015. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses [J]. *J Plant Nutr Fert*, 21(4): 836-845. [侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等, 2015. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡 [J]. *植物营养与肥料学报*, 21(4): 836-845.]
- HU JM, JIANG LG, XU SH, et al, 2014. Relationship between post-anthesis dry matter remobilization from culm, leaf in different position and grain growth of *Indica* rice varieties Bagui-xiang and Guihuazhan [J]. *Guihaia*, 34(4): 442-449. [胡钧铭, 江立庚, 徐世宏, 等, 2014. 籼稻桂华占、八桂香花后营养器官干物质流转与籽粒灌浆关系 [J]. *广西植物*, 34(4): 442-449.]
- LIU EK, ZHAO BQ, MEI XR, et al, 2010. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(4): 1035-1041. [刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等, 2010. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚及有机碳分布的影响 [J]. *生态学报*, 30(4): 1035-1041.]
- MIKHA MM, RICE CW, 2004. Tillage and manure effect on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 68(3): 809-816.
- PAN SG, HUANG SQ, ZHAI J, et al, 2012. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice [J]. *Soils*, 44(1): 23-29. [潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等, 2012. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响 [J]. *土壤*, 44(1): 23-29.]
- QIAN YF, SHAO CH, QIU CF, et al, 2015. Effects of one-off basal application of different types of nitrogen fertilizer varieties on yield of double-cropping rice and utilizing rate of nitrogen [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 27(3): 50-52. [钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等, 2015. 不同类型氮肥品种一次性基施对双季稻产量及肥料利用的影响 [J]. *江西农业学报*, 27(3): 50-52.]
- YAN C, DING YF, WANG QS, et al, 2008. Effect of panicle fertilizer application rate on morphological, ecological characteristics, and organ temperature of rice [J]. *Acta Agr Sin*, 34(12): 2176-2183. [闫川, 丁艳锋, 王强盛, 等, 2008. 穗肥施量对水稻植株形态、群体生态及穗叶温度的影响 [J]. *作物学报*, 34(12): 2176-2183.]
- YUAN LH, 2010. *Microbiology experiment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press. [袁丽红, 2010. *微生物学实验* [M]. 北京: 化学工业出版社.]
- ZHANG AP, GAO J, LIU RL, et al, 2015. The comparison of different fertilizer technologies on nitrogen leaching losses and nitrogen use efficiency in rice production-taking Ningxia irrigation region as an example [J]. *J Agric Res Environ*, 32(2): 175-184. [张爱平, 高霁, 刘汝亮, 等, 2015. 应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对—以宁夏引黄灌区为例 [J]. *农业资源与环境学报*, 32(2): 175-184.]
- ZHANG FS, WANG JQ, ZHANG WF, et al, 2008. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedol Sin*, 45(5): 915-924. [张福锁, 王激清, 张卫峰, 等, 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 45(5): 915-924.]
- ZOU Q, 2004. *Experimental instruction of plant physiology* [M]. Beijing: Agricultural Press of China. [邹琦, 2004. *植物生理学实验指导* [M]. 北京: 中国农业出版社.]