

休闲稻田消解沼液生态效应及其对水稻安全生产影响研究

姜丽娜¹, 王 强¹, 李艾芬², 钱士明², 符建荣¹, 马军伟¹, 叶 静¹, 汪建妹¹

(1.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2.浙江省嘉兴市南湖区农业经济局, 浙江 嘉兴 314051)

摘 要:为研究利用休闲稻田消解沼液生态效应及对后季水稻安全生产、土壤肥力及质量的影响,在浙江省嘉兴市脱潜渚育型水稻土青紫泥田上,进行4年定位田间试验,考察了休闲季灌施不同用量沼液对水稻产量、稻谷、土壤中有害重金属含量差异以及土壤中养分含量的变化,提出休闲稻田沼液消解安全容量。研究表明:休闲稻田灌施沼液可有效消解单一水稻轮作制地区沼气工程冬春季产生的沼液,每公顷休闲稻田每年安全消纳沼液3 000 t,后季水稻可在不施化学氮、钾肥,减半施用磷肥的基础上获得与全化肥处理相近或略高的产量;休闲季灌施沼液对土壤肥力有明显改善作用,土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾都明显高于不灌沼液处理,但除土壤速效钾和缓效钾外,各种养分含量年度递增趋势并不明显,没有出现养分过度累积导致的富营养化;与全化肥处理相比,休闲季灌施沼液后土壤及稻谷中有害重金属含量没有明显增加;综合沼液灌溉对产量、土壤质量、稻谷安全品质监测结果,在水稻生产安全、土壤可持续利用的目标下,确定休闲稻田沼液安全消解容量为 $N\ 1\ 500\ kg\cdot hm^{-2}$ 。

关键词:休闲稻田;沼液消解;产量;土壤质量;重金属

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2483-08

The Ecological Effects of Fallow Paddy Field Disposal Biogas Slurry and Its Impact on the Following Rice Safety Production

JIANG Li-na¹, WANG Qiang¹, LI Ai-fen², QIAN Shi-ming², FU Jian-rong¹, MA Jun-wei¹, YE Jing¹, WANG Jian-mei¹

(1.Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2.Agricultural Economy Bureau of Nanhu District of Jiaxing City of Zhejiang Province, Jiaxing 314051, China)

Abstract:The ecological effects of fallow paddy field disposal of biogas slurry (BS) were studied through a 4-year field experiments with a fallow-rice cropping system. We investigated the variations of soil nutrient contents after BS irrigation in fallow paddy field, and examined the difference of the following rice yields, heavy metal contents in rice grain and in soil with different BS irrigation treatments in the before fallow season. Results showed that, in the fallow-rice cropping system region, the quantity of BS disposal in the fallow paddy field could reached to $3\ 000\ t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, and it would supply sufficient nutrient of N and K for the following rice production. The mean yield of following rice in BS treatment plots were similar or slightly higher than that in chemical fertilizer (CF) treatment with no extra nitrogen and potassium applications. Soil nutrient contents (O.M., Total N, available N, available P, available K and slowly available K) after every season of BS irrigation were significant higher than that in chemical fertilizer treatment plots; However, except soil available and slowly available K, the increasing trend of other nutrients in the BS irrigation plots is not obvious, and there does not appear excessive accumulation of nutrients in eutrophication. Heavy metal contents (Cd, Pb, Hg and As) did not increase significantly in rice grain and in the soil with BS irrigation. We suggest that, based on nitrogen, a safe capacity of biogas slurry disposal in fallow paddy field was $N\ 1\ 500\ kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ for the premise of ensuring rice production and food security, as well as soil environment safety.

Keywords:fallow paddy field; biogas slurry disposal; rice yield; soil quality; heavy metal

收稿日期:2011-05-17

基金项目:浙江省重大(优先主题)项目(2008C13049);国家基金国际合作项目(40810175);浙江省重大项目(2005C13004)

作者简介:姜丽娜(1957—),女,浙江宁波人,研究员,主要从事土壤肥料、废弃物资源化利用等研究。E-mail: jln@mail.hz.zj.cn

畜禽废弃物的“零排放”是我国为保护环境而致力推广“猪-沼-肥”生态养殖模式的主要目标之一,沼气工程产生大量沼液的全面消解利用则是这一生态模式成败的关键。生态养殖模式中通过作物利用沼液作肥料为主的方法消解沼液,但由于沼气工程沼液产生的时间与作物利用沼液时间的不同步,即便在多种作物种植的复合农作地区要达到沼液的全年全量消解也极其不易,而在单季稻(晚稻)-冬春季休闲轮作制地区,水稻生长季节需肥局限在几个月中,冬春农田休闲季节没有作物利用沼液,大量沼液只能违规排放,休闲稻田沼液消解是为这一地区设计的季节性土地处理方式。土地处理早在几百年前就成为许多国家处理农牧业废水的主要方法^[1],近年来逐渐向人工湿地处理废水发展^[2-5],但很少有利用季节性休闲稻田进行农牧废水消解的研究,国内对水稻生长季利用沼液的研究较多^[6-9],日本及韩国等国家有水稻生长季消解废水潜力及对水稻生产安全性影响的研究^[10-11],以休闲稻田作为受体消解沼液的生态效应及在超作物需肥量沼液进入稻田后对土壤可持续及后季作物生产安全性影响的研究国内外还很少有报道。本文通过稻田休闲季消解沼液 4 年定位试验,明确休闲季稻田消解沼液的效果及消解容量、评价对后季水稻安全生产及对土壤质量的影响,在理论上明确休闲季水田季节性人工湿地消解沼液的可行性,为农田安全消解沼液提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

休闲季消解沼液大区对比定位试验,自 2007 年开始在浙江省嘉兴市南湖区七星镇东进村(N 30.832 47°,E120.840 000°)进行。供试作物为单季晚稻,2007 年水稻品种为秀水 33,2008 年为秀水

114,2009 年和 2010 年均均为秀水 134。
供试土壤为脱潜潴育型水稻土亚类黄斑青紫泥田,基本农化性状为:有机质 42.2 g·kg⁻¹、pH6.55、全氮 3.2 g·kg⁻¹、碱解氮233.9 mg·kg⁻¹、有效磷 29.3 mg·kg⁻¹、有效钾 165 mg·kg⁻¹、缓效钾 441.8 mg·kg⁻¹,土壤全镉 0.24 mg·kg⁻¹、全铅 71.2 mg·kg⁻¹、全汞 0.44 mg·kg⁻¹、全砷 7.4 mg·kg⁻¹。供试沼液来自嘉兴绿嘉园种猪场沼气工程,平均沼液中全氮含量为 571 mg·kg⁻¹,碱解氮含量约为 483 mg·kg⁻¹,全 P₂O₅ 含量为 72 mg·kg⁻¹,全 K₂O 含量为 351 mg·kg⁻¹。沼液含镉 0.000 084 mg·L⁻¹、铅 0.000 58 mg·L⁻¹、砷 0.001 03 mg·L⁻¹、汞 0.000 036 mg·L⁻¹(分别按 GB/T 7475—1987、GB/T 7485—1987、GB/T 7468—1987 测定)。

1.2 试验设计

沼液稻田休闲季消解田间大区定位试验,文中所涉是 2007—2010 年连续 4 年定位试验结果,该定位试验仍在继续进行中。

2007 年试验设 3 个处理(大区面积 100 m²),分别为不施沼液(BS0)、沼液 N 1 500 kg·hm⁻²(BS1500)及沼液 N 2 500 kg·hm⁻²(BS2500)。2008 年开始每个处理一分为二成 6 个处理(大区面积 50 m²),不施沼液处理分为不施沼液处理及隔年灌(BS1500-2Y)处理,沼液 N 1 500 kg·hm⁻²处理则分别分为每年灌沼液 N 1 500 kg·hm⁻²(BS1500-4Y)及灌两年休闲一年(BS1500-3Y),沼液 N 2 500 kg·hm⁻²(BS2500)也分成连续灌(BS2500-4Y)及灌两年休闲一年(BS2500-3Y)处理(表 1),按沼液含氮量 500 mg·kg⁻¹折算成沼液实物量在稻田休闲季分 3~5 次灌施,每次灌 10 cm 深,两次间隔时间为 10~20 d。后季水稻施肥不施沼液处理施用全化肥(BS0-CF),N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 270、90、150 kg·hm⁻²,每年保持不变,休闲季施沼液处理则根据氮磷钾不低于全化肥处理原则大部分不

表 1 稻田休闲季消解沼液定位试验设计

Table 1 Experiment design of fallow paddy field biogas slurry disposal

编号	处理代号	处理	休闲季沼液处理/kg N·hm ⁻²				水稻季化肥 N/kg·hm ⁻²				水稻季化肥 P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²			
			2007	2008	2009	2010	2007	2008	2009	2010	2007	2008	2009	2010
1	BS0-CF	不施沼液全化肥	0	0	0	0	270	270	270	270	90	90	90	90
2	BS1500-2Y	隔年灌用量 I	0	1 500	0	1 500	270	0	135	90	90	45	45	45
3	BS1500-4Y	每年灌用量 I	1 500	1 500	1 500	1 500	135	0	0	0	0	45	45	45
4	BS1500-3Y	灌 2 休 1 用量 I	1 500	1 500	0	1 500	135	135	90	0	0	45	30	45
5	BS2500-4Y	每年灌用量 II	2 500	2 500	2 500	2 500	0	0	0	0	0	45	30	30
6	BS2500-3Y	灌 2 休 1 用量 II	2 500	2 500	0	2 500	0	135	0	0	0	45	45	30

注:不施沼液全化肥处理水稻生长季施 K₂O 150 kg·hm⁻²,其他处理不施 K₂O。

施,有的试验年度根据前一年水稻生长状况及研究需要施氮、磷肥,施用量低于全化肥处理的1/2量(表1),施沼液处理钾投入量已明显大于全化肥处理,且水稻生长中未出现钾缺乏症状,所以休闲季施沼液处理后季水稻都不施钾肥。

1.3 采样及测定方法

在休闲季灌沼液完成后(水稻种植前)及水稻收获后采集各处理0~20 cm耕层土壤混合样品1 kg,风干磨碎后供分析测试,水稻收获期各处理采3丛稻株样品,稻秆和稻谷分别烘干磨碎制样,按常规方法测定养分含量及肥力指标,测定稻谷中全砷、全铅、全镉、全汞含量(分别按GB/T 5009.11—2003、GB/T 5009.12—2003、GB/T 5009.15—2003、GB/T 5009.17—2003测定),测定土壤中总砷、总汞及总铅、总镉含量(分别按GB/T 17134—1997、GB/T 17136—1997、GB/T 17141—1997测定)。

1.4 统计分析

本文中水稻产量数据、土壤养分及谷粒、土壤重金属含量等多年数据按两因素无重复模型(因素1处理,因素2年度)进行方差分析及LSD显著性测验,用Excel进行数据处理及绘图,统计分析用DPS V2.0软件。

2 结果与分析

2.1 休闲季稻田消解沼液的生态效应

四年定位试验结果表明,休闲稻田可有效消解单一水稻种植地区冬春季沼气工程产生的沼液,在水稻收获后至第二年水稻种植前的休闲季节,把沼气工程产生的沼液灌入周边休闲稻田,利用田埂闭蓄10 cm深的沼液,通过土壤吸附、液面蒸发等作用消解沼液,在自然落干后,再灌第二次,连续灌3~5次后,每公顷休闲稻田可消纳沼液3 000~5 000 t,相当于日处理80 t废水沼气工程37.5~75 d产生的沼液量。以12月至第二年6月产生的沼液量14 560 t计算,只要2.43~4.85 hm²休闲稻田就可消纳冬春季产生的沼液,以3年轮换1次计算,在80 t容量沼气工程周边,配备7.28~14.56 hm²稻田就可基本消解沼气工程冬春季产生的沼液。休闲稻田冬春季休闲时间较长,对沼液灌入时间没有严格的要求,有充足的农田空间和时间来消纳沼气工程产生的沼液,同时由于休闲季稻田无作物种植,避免了大量高浓度沼液可能对作物的伤害,单位面积消解量大于水稻生长季沼液消解量5~9倍。由于休闲稻田消解沼液,解决了单一水稻种植地区冬

春季无作物利用沼液的难题,避免了沼液排放污染水体,按本试验供试沼液COD 1 000 mg·kg⁻¹、N 500 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 60 mg·kg⁻¹、K₂O 300 mg·kg⁻¹计算,每公顷休闲稻田每年可承纳COD 3 000~5 000 kg、N 1 500~2 500 kg、P₂O₅ 180~300 kg、K₂O 900~1 500 kg,减排生态效应明显。

休闲季稻田灌沼液后,随沼液进入农田的氮、磷、钾等贮存在农田中,后季水稻种植时,基本不施氮、钾化学肥料,只施用常规用量50%的磷肥就可以获得高产,后季水稻节约化学N 270 kg·hm⁻²、P₂O₅ 67.5 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻²,节肥降成本效应明显。

2.2 休闲季沼液稻田消解对后季水稻产量的影响

2007—2010年4年定位试验产量结果(图1)表明,稻田休闲季每年灌施及年度间隔灌施N 1 500~2 500 kg·hm⁻²沼液处理的后季水稻年平均产量与全化肥处理相比差异不显著,但从4年总产量看,各处理排序为BS0-CF>1500-3Y>1500-4Y>1500-2Y>2500-4Y>2500-3Y,沼液用量N 1 500 kg·hm⁻²处理产量高于N 2 500 kg·hm⁻²处理,1500-3Y和1500-4Y处理总产量接近全化肥处理。从分年度产量看,1500-3Y和1500-4Y处理,4年中有3年比全化肥处理平产或增产,而2500-4Y和2500-3Y处理,4年中有3年水稻产量低于全化肥处理,表明每年灌施沼液N 1 500 kg·hm⁻²处理比每年灌施沼液N 2 500 kg·hm⁻²处理高产和稳产。根据田间水稻生长观察,1500-4Y处理2009年水稻始穗期及齐穗期比全化肥处理推迟4 d,灌施沼液时期不适合使前期秧苗生长滞缓(最后一次灌沼液离水稻移栽只有7 d,移栽时田面还留有沼液,秧苗直接种植在沼液中)是引起减产的主要原因,而不是由于连续灌沼液引起的减产。连续灌施沼液N 2 500 kg·hm⁻²处理减产年份普遍有生长早期伤苗现象,施用沼液量过大可能是引起水稻减产的主要原因。

4年定位试验产量结果分析表明,连续4年休闲稻田每年灌施N 1 500 kg·hm⁻²沼液对后季水稻生产是安全的,水稻产量与全化肥处理相比平产或略有增产,没有产生营养累积过多引起水稻营养生长和生殖生长不协调。而连续每年灌施沼液N 2 500 kg·hm⁻²处理,有影响前期秧苗生长而减产的风险。休闲季灌施沼液过迟也会对后季水稻生长产生不良影响,应控制在水稻移栽前一个月以上完成灌施沼液,以保证后季水稻秧苗不受沼液伤害。

休闲季稻田灌施N 1 500 kg·hm⁻²沼液处理每年

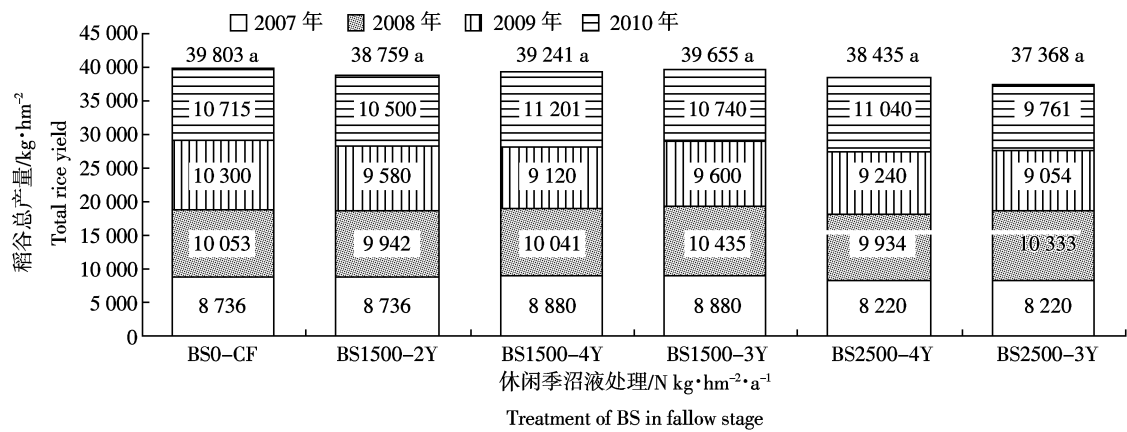


图 1 水田休闲季沼液消解对水稻产量的影响

Figure 1 Effect of biogas slurry application in fallow stage of rice field on rice yield

投入的氮量从理论上计算,相当于 5 倍以上水稻需氮量,如假定随沼液灌入的氮只是贮存于土壤为水稻利用,沼液中氮的量足够供应 5 个年度单季晚稻所需的氮,且随连续施用年度增加土壤中积累的氮会越来越多,可能造成土壤的富营养化。但从 2009 年试验结果看,当年不施沼液处理在施用相当于全化肥处理 1/2~1/3 氮肥的基础上,水稻产量仍明显低于全化肥处理,田间植株生长明显表现出供氮不足,表明尽管前两年每年随沼液带入的氮量大于作物吸收量的几倍,但并没有显示出明显的后效,表明休闲季灌施沼液以供给当年单季晚稻所需氮素为主,对第二年水稻的供氮能力较小,休闲季施入的氮大部分为作物、土壤所消解。

2.3 休闲季稻田沼液消解对后季水稻养分吸收的影响

休闲稻田灌施沼液在消解沼液的同时,沼液中的氮磷钾等会对后季的水稻营养吸收产生影响。植株采样测定结果可看出(表 2),休闲季沼液处理后,后季

水稻分蘖盛期氮、磷、钾含量与全化肥处理相比没有明显差异,收获期秸秆和稻谷中氮含量明显高于全化肥处理,秸秆中钾含量明显增加,稻谷中钾含量增加不明显,沼液用量处理间氮、钾含量差异不显著,但秸秆和稻谷中磷含量在高用量处理时明显低于全化肥处理和较低用量沼液处理。施沼液处理收获期秸秆、稻谷中氮含量明显提高,表明施沼液处理对水稻中后期的供氮能力大于全化肥处理,有利于青秆黄熟,但也易在不良气候条件下出现倒伏及推迟成熟引起减产。高沼液用量下收获期水稻秸秆和稻谷中磷含量下降,从磷的投入量为高沼液用量大于低用量看,是否存在施用高量沼液对水稻磷的吸收产生抑制作用等还有待进一步研究。植株分析结果表明,休闲季沼液消解带入稻田的氮、磷、钾可基本满足后季水稻生长所需的氮、钾营养,但高量施用沼液后可能出现磷吸收不足,应适当补充施用化学磷肥,为防止后期水稻氮过量引起的贪青迟熟及倒伏,应加强后期管理。

2.4 沼液水田消解对稻谷食品安全性影响

休闲季稻田沼液无害化消解不仅要保证稻谷高产,还必须保证稻谷的食品安全,由于沼液中含有对人体有害的重金属(含量均低于国家灌溉水标准),沼液农田消解对籽粒中重金属含量的影响必须得到客观的评价。连续 4 年采样测定结果表明(表 3):休闲季稻田每年施用 N 1 500~2 500 kg·hm⁻² 沼液用量下,后季种植水稻谷粒中镉、铅、汞、砷平均含量与休闲季不灌沼液、水稻种植季施全化肥处理相比没有差异,休闲稻田连续 4 年每年施用沼液 1 500~2 500 N kg·hm⁻² 对后季稻谷食品安全性没有影响。稻谷重金属含量年度间有一定差异,特别是 2007 年和 2008 年测定稻谷中镉、铅含量明显高于后两年,但观察全化肥处

表 2 施用沼液对水稻氮磷钾养分含量的影响

Table 2 Effect of application biogas slurry in fallow paddy field on nutrient content of plant and grain

采样时期	处理	N/ mg·kg ⁻¹	P/ mg·kg ⁻¹	K/ mg·kg ⁻¹
分蘖盛期植株	BS0-CF	32.2a	3.7a	30.2a
	BS1500	31.5a	3.2a	30.0a
	BS2500	33.7a	3.6a	29.2a
收获期植株	BS0-CF	11.0b	1.5a	25.5b
	BS1500	13.8a	1.5a	27.8a
	BS2500	12.6ab	1.1b	27.1a
收获期稻谷	BS0-CF	12.1b	2.82ab	5.3a
	BS1500	14.4a	2.87a	5.5a
	BS2500	14.3a	2.75b	5.6a

注:小写字母不同表示处理间差异达极显著(P<0.05)。下同。

表 3 休闲季农田沼液消解对稻谷中重金属含量的影响

Table 3 Fallow paddy field biogas slurry disposal to grain heavy metal content influence

试验年度	处理	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Hg/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹
2007 年	CF	0.031	0.72	<0.000 15	0.13
	BS1500	0.034	0.47	<0.000 15	0.12
	BS2500	0.032	0.54	<0.000 15	0.12
2008 年	CF	0.038	0.83	0.004 56	0.088
	BS1500	0.027	0.85	0.002 07	0.100
	BS2500	0.032	0.83	0.002 02	0.094
2009 年	CF	0.017	0.13	<0.000 15	0.22
	BS1500	0.019	0.16	<0.000 15	0.16
	BS2500	0.034	0.15	<0.000 15	0.11
2010 年	CF	0.017	0.089	<0.000 15	0.13
	BS1500	0.015	0.089	<0.000 15	0.12
	BS2500	0.025	0.060	<0.000 15	0.14
4 年平均	CF	0.026a	0.44a	0.002 3a	0.14a
	BS1500	0.024a	0.39a	0.001 6a	0.13a
	BS2500	0.031a	0.40a	0.001 6a	0.12a
LSD _{0.05}		0.010	0.12	0.001 3	0.05

注:汞含量计算平均值时<0.000 15 的按 0.000 15 计算。

理与沼液处理间没有差异,所以年度间重金属含量的变化不是由于施沼液引起,可能与当地环境变化有关。

2.5 休闲季稻田沼液消解对土壤质量的影响

2.5.1 休闲季稻田施用沼液对土壤养分的影响

休闲稻田灌施沼液后,大量氮磷钾等养分随沼液进入农田,可能对土壤肥力产生影响。在沼液灌溉后(后季水稻种植前)及后季水稻收获后采样测定土壤肥力指标,从图 2 可看出,休闲季灌施沼液对土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾的影响有所不同,与全化肥处理相比,第一年灌施沼液处理土壤 pH 明显提高,以后 3 年中趋于稳定,且与全化肥处理差异不大;土壤有机质也是在第一年施用后明显增加,且在后几年中都保持高于全化肥处理,但随沼液连续施用年度增加而逐年上升的趋势不明显;连续灌施沼液对土壤全氮、碱解氮的影响较大,有明显的减缓土壤氮肥力下降的作用。由于试验点水稻产量水平较高,4 年定位试验期间全化肥处理土壤全氮、碱解氮呈逐年下降趋势,尤其是第 3 年后更加明显,而施用沼液处理逐年降低的幅度较小,且大部分时间土壤全氮、碱解氮含量都高于全化肥处理,随施用量增加全氮提高幅度增加,但碱解氮随沼液用量提高而增加的趋势不明显;施用沼液对土壤速效磷的影响与氮不同,从施用沼液的第 1 年开始,土壤速效磷就明显

高于全化肥处理,且随沼液用量提高而提高,速效磷有随施沼液、化肥年数增加逐年提高的趋势,施沼液对植株磷含量影响的结果表明,高量沼液处理植株中磷含量下降,不是由于土壤供磷不足,而是过多施用沼液影响植株吸收磷;休闲稻田施用沼液对土壤速效钾、缓效钾的提高最明显,全化肥处理虽然每年施用钾肥,但土壤速效钾、缓效钾基本处于较稳定的状态,施用沼液后土壤速效钾从第 1 年就开始明显提高,稳定 2 年第 3 年施用后又明显提高,土壤缓效钾的提高滞后于速效钾,在第 3 年后得到明显提高,且明显高于全化肥处理。

从土壤全氮、碱解氮、速效钾、缓效钾的变化趋势还可看出,每年 11 月(水稻收获后)含量都明显低于每年 6 月(沼液灌后,种稻前),收获期土壤肥力指标与种稻前有较大的差异,特别是土壤碱解氮、速效钾、缓效钾明显降低,施用沼液处理与全化肥处理的差异变小,表明休闲季施沼液贮肥于田的效果明显,休闲季在土壤中积累的氮、钾,经水稻种植季后,可大部分被作物、土壤消解,有效地减缓农田肥力的过度富营养化。

2.5.2 沼液农田消解对土壤中有害重金属的影响

休闲稻田沼液消解对土壤重金属含量的影响评估对水稻安全生产十分重要。施用沼液对土壤重金属的积累,主要决定于随沼液带入的重金属总量,而重金属总量又决定于沼液中重金属的浓度及沼液用量。根据休闲季试验沼液施用量 3 000~5 000 t·hm⁻² 计算,带入农田的重金属镉、铅、砷、汞的量分别在 252~420 mg·hm⁻²、1 740~2 900 mg·hm⁻²、3 090~5 150 mg·hm⁻² 和 108~180 mg·hm⁻² 之间。如假定带入的重金属全部滞留在表层土壤中,每年土壤耕作层重金属镉、铅、砷、汞含量分别增加 0.112~0.187 μg·kg⁻¹、0.773~1.288 μg·kg⁻¹、1.373~2.289 μg·kg⁻¹ 和 0.048 0~0.080 0 μg·kg⁻¹。连续 10 年、每年施用 5 000 t·hm⁻² 沼液,土壤中镉、铅、砷、汞的浓度分别可增加 0.001 87、0.012 9、0.022 9、0.000 8 mg·kg⁻¹,与国家土壤质量标准相比,增加量很少。沼液携入重金属量计算结果表明,在本试验条件下,稻田休闲季灌施沼液带入的重金属量很少,不会造成重金属大量积累而引起土壤中重金属含量超标,沼液农田施用是安全的。

为验证农田施用沼液对土壤重金属含量的影响,采集休闲季施沼液试验中土壤样品测定重金属含量(表 4),结果表明在休闲季沼液 3 000~5 000 t·hm⁻² 用量下,与不灌沼液全化肥处理相比,土壤镉、铅、汞、砷

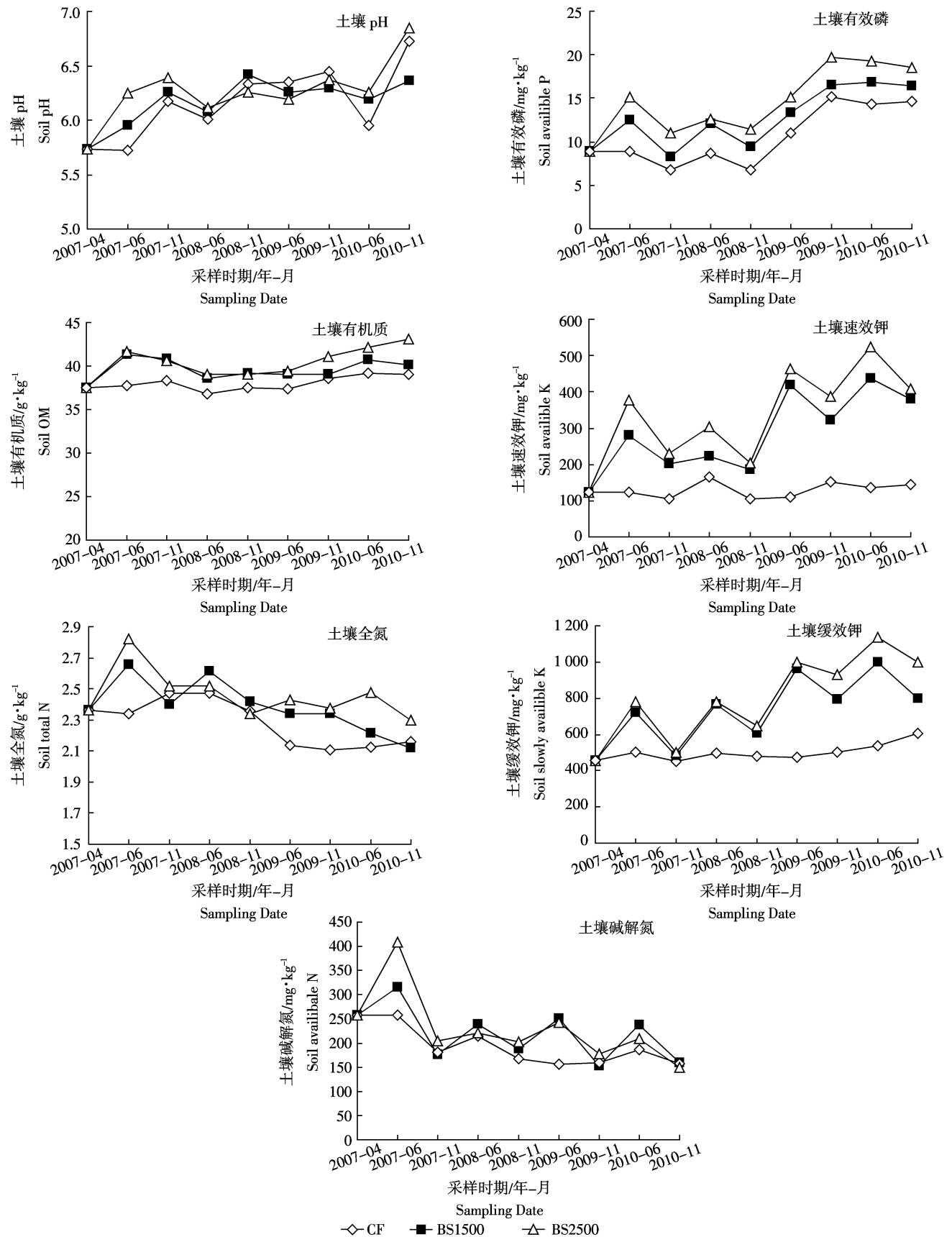


图 2 休闲季稻田沼液消解对土壤养分含量的影响

Figure 2 Effect of biogas slurry disposal in fallow paddy field on soil nutrient contents

等含量没有明显的增加,表明这些重金属的积累不随沼液施用量的提高而明显增加,沼液中镉、铅、汞、砷在土壤中的积累风险相对较小。表 4 中 4 年测定结果数据有一定的波动,可能与分年取样、测定有一定误差有关,2007 年全镉含量以及除 2010 年外的所有年度全汞含量都接近国家限制标准,可能与原始土壤中镉、汞含量较高(0.24 、 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)有关。第 1 年施用化肥和沼液对土壤镉影响较小,随着试验年度的增加,施用化肥和沼液处理镉含量有明显下降的趋势。

表 4 休闲季施用沼液对土壤重金属含量的影响

Table 4 Fallow paddy field biogas slurry disposal to soil heavy metals content influence

试验年度	处理	T-Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	T-Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	T-Hg/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	T-As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
2007 年	CF	0.29	33.1	0.27	7.8
	BS1500	0.30	33.5	0.27	7.3
	BS2500	0.27	33.2	0.27	7.7
2008 年	CF	0.14	30.3	0.28	6.2
	BS1500	0.14	30.5	0.25	6.3
	BS2500	0.098	30.0	0.33	5.5
2009 年	CF	0.19	37.7	0.16	8.6
	BS1500	0.15	38.1	0.19	7.5
	BS2500	0.16	36.4	0.18	7.9
2010 年	CF	0.18	32.4	0.29	5.3
	BS1500	0.16	31.9	0.31	5.1
	BS2500	0.14	28.1	0.32	5.1
平均	CF	0.20a	33.4a	0.25a	7.0a
	BS1500	0.19ab	33.5a	0.26a	6.6a
	BS2500	0.17b	31.9a	0.28a	6.6a
	LSD _{0.05}	0.023	1.83	0.037	0.58
国家土壤环境质量标准 GB 15618—1995*		0.3	250	0.3	30

* 按土壤二级质量标准,土壤 pH<6.5,水田。

2.6 基于稻田安全生产及土壤质量可持续的休闲季稻田沼液消解容量

休闲季稻田沼液消解是季节性人工湿地处理废水方法,就消解沼液而言,应充分发挥稻田生态系统对沼液的消解潜力。由于沼液消解的承载方是稻田,又与后季水稻生长密切相关,沼液稻田消解就是要在水稻生产安全、稻田土壤可持续利用的目标下确定稻田沼液安全消解容量。沼液的消解容量与沼液用量及沼液浓度有关,由于沼液浓度在不同沼气工程、不同季节都有变化,不宜以沼液用量为消解容量。为了使沼液消解容量表征标准化,以年度单位面积投入氮量表示农田沼液消解容量,可以消除沼液浓度差异对沼

液消解容量的影响。从上文中不同沼液用量对水稻产量、稻谷安全品质、土壤肥力及土壤有害重金属含量等分析,休闲季沼液消解容量为每年施用 $\text{N } 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 沼液,可保证后季水稻安全生产及土壤可持续两重目标,而每年施用 $\text{N } 2500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 沼液,虽然对稻谷产品的安全及土壤质量安全与 $\text{N } 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理没有差异,但水稻产量低于 $\text{N } 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 沼液处理,而且土壤中氮、钾提高比较明显,水稻后期生长有贪青迟熟及倒伏现象,农田富营养化趋势已初步显示出来。从农田生态安全及土壤持续利用来衡量,确定每年施用 $\text{N } 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为休闲季沼液消解的安全消解容量。

3 讨论

通过 4 年的长期田间定位试验确定休闲季稻田沼液消解的安全容量为 $\text{N } 1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,约为水稻常规施氮量的 5.5 倍。在该安全容量下,后季水稻生产安全、农产品质量安全、土壤肥力和土壤质量安全。本文提出的休闲季稻田消解容量是本项目组研究提出的水稻生长季沼液消解安全容量 $\text{N } 540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的近 3 倍^[12],但二者对水稻产量和重金属在稻谷和土壤中无明显积累的结果基本一致,在沼液消解后土壤有机质、全氮和碱解氮变化则有不同,生长季消解沼液几项指标没有明显增加,而休闲季沼液消解表现明显增加,这可能与沼液灌施量几倍于生长季有关。休闲季沼液消解与水稻生长不同步,消除了过高、过浓沼液对水稻生长的限制,因而可比作物生长季消解更大量的沼液。国内水稻生长季沼液用量都在 $\text{N } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以下^[9],国外在水稻上消解利用畜禽废水最大用量不超过 $\text{N } 405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13],在旱地最大的畜禽废水用量为 $\text{N } 774 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14],但在生长季施用高用量废水时出现作物倒伏、品质下降的现象,说明已超过安全消解容量。

国内外很少有报道休闲稻田沼液消解的研究,黄治平等^[15-16]对 8 年连续畜禽废水污灌对土壤影响研究中,猪场废水每年灌溉量达 $3600 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,折算成氮用量,与本研究沼液安全容量接近,其污灌土壤铅、砷、镉等重金属富集较小,土壤中有机质、全氮、碱解氮有明显增加的结果与本文研究结果一致。休闲季稻田沼液消解后有机质和氮虽然有所积累,但是逐年递增的趋势不明显,土壤富营养化的风险很小,这与黄治平研究结果一致,可能是由于休闲稻田灌施沼液后,土壤中微生物系统改变适应了大量沼液提

供的氮和碳,达到新的同化与矿化的平衡,氮的挥发损失也可能是氮不在土壤中大量累积的原因之一。

4 结论

利用休闲稻田灌施沼液可有效消解沼气工程冬、春季产生的沼液,每公顷休闲稻田每年可安全消纳3 000 t 沼液。后季水稻可在不施化学氮、钾肥,减半施用磷肥的基础上获得与全化肥处理相近或略高的产量。稻田休闲季消解沼液对土壤肥力有明显改善作用,土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾都明显高于不灌沼液处理,除土壤速效钾、缓效钾外,随灌施年度增加养分含量递增的趋势不明显,没有出现养分过度累积而出现的富营养化;由于后季水稻的吸收利用,水稻收获后氮、钾含量比灌施沼液后明显下降。休闲季沼液消解对后季水稻的安全生产没有明显影响,后季稻谷及土壤中重金属含量的积累与全化肥处理相比,没有明显的差异。

综合沼液灌溉对产量、土壤质量、稻谷安全品质监测结果,在水稻生产安全、土壤可持续利用的目标下,确定休闲稻田沼液安全消解容量为 $N\ 1\ 500\ kg \cdot hm^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 郭笃发,陈友云. 污水土地处理系统的研究现状[J]. 山东师范大学学报(自然科学版),1994,9(2):85-88.
GUO Du-fa, CHEN You-yun. Review of wastewater land treatment system research [J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Sciences Edition)*, 1994, 9(2):85-88.
- [2] 何江涛,钟佐桑,汤鸣皋,等. 污水土地处理技术与污水资源化[J]. 地学前缘,2001,8(1):155-161.
HE Jiang-tao, ZHONG Zuo-shen, TANG Ming-gao, et al. The techniques of wastewater land treatment and renovation of wastewater[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(1):155-161.
- [3] 黄玉珠,万红友. 污水土地处理技术的优势及其应用前景[J]. 环境科学导刊,2008,27(6):71-75.
HUANG Yu-zhu, WANG Hong-you. Advantages and application prospect of wastewater treatment by land treatment technology[J]. *Environment Science Survey*, 2008, 27(6):71-75.
- [4] 廖新伟,骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(1):113-117.
LIAO Xin-di, LUO Shi-ming. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1):113-117.
- [5] 张 华,陈晓东,常文越,等. 畜禽养殖污水生态处理及资源化利用方式的探讨[J]. 环境保护科学,2007,33(3):38-40.
ZHANG Hua, CHEN Xiao-dong, CHANG Wen-yue, et al. Discussion on the resource utilization and eco-treatment for livestock and poultry farm wastewater[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(3):38-40.
- [6] 王远远,刘荣厚. 沼液综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(4):1089-1091.
WANG Yuan-yuan, LUI Rong-hou. Progress of comprehensive utilization of biogas slurry [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35 (4):1089-1091.
- [7] 伍玉光,曾广初,曾秋萍. 沼液在粮食生产中的试验效果分析[J]. 江西能源,2004(4):43-44.
WU Yu-guang, ZENG Guang-chu, ZENG Qiu-ping. The Plenty of scope for the liquid manure of methane used in grain production[J]. *Jiangxi Energy*, 2004(4):43-44.
- [8] 杨 志,杜小军. 沼液对水稻生育及产量影响效果的初步研究[J]. 广东农业科学,2010(1):58-59.
YANG Zhi, DU Xiao-jun. Study on effect of anaerobic processed liquid of livestock manures on the growth, development and yield of rice[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2010(1):58-59.
- [9] 张 进,张妙仙,单胜道,等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(10):2005-2009.
ZHANG Jin, ZHANG Miao-xian, SHAN Sheng-dao, et al. Growth status, grain yield and heavy metals content of rice (*Oryza sativa* L.) as affected by biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2005-2009.
- [10] Kim J G. Influence of liquid pig manure on rice growth and nutrient movement in paddy soil under different drainage conditions[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2004.
- [11] Gnanamani A, Kasturi Bai R. Influence of biodegraded slurry on rice-gram cultivation[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 41(3):217-221.
- [12] 姜丽娜,王 强,陈丁江,等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(7):1328-1336.
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1328-1336.
- [13] Zhou S, Nishiyama K, Watanabe Y, et al. Nitrogen budget and ammonia volatilization in paddy fields fertilized with liquid cattle waste[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2009, 201(1):135-147.
- [14] Mantovi P, Baldoni G, Toderi G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: Effects of long-term application on soil and crop[J]. *Water Research*, 2005, 39(2-3):289-296.
- [15] 黄治平,徐 斌,涂德浴,等. 规模化猪场废水灌溉农田土壤 Pb、Cd 和 As 空间变异及影响因子分析[J]. 农业工程学报,2008,24(2):77-83.
HUANG Zhi-ping, XU Bin, TU De-yu, et al. Spatial variability and affecting factors of Pb, Cd and As in farmland soils irrigated by swine wastewater[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2):77-83.
- [16] 黄治平,徐 斌. 猪场废水灌溉区农田土壤养分空间变异[J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):61-63.
HUANG Zhi-ping, XU Bin. Spatial variability of soil nutrients in farmland soil of swine wastewater applied[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(4):61-63.