

猪粪沼液施用对稻、麦产量和氮磷吸收的影响^①

黄红英^{1,2}, 曹金留³, 常志州^{1,2*}, 曹云^{1,2}

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2 江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 南京 210014;

3 江苏省农林职业技术学院, 江苏句容 212400)

摘要:在江苏太湖稻麦轮作区, 开展了连续 2 年不同沼液替代化肥比例及沼液基追比的等氮田间试验, 结果表明: 单施化肥处理(NPK)及沼液化肥配施处理水稻、小麦生物量及产量均显著高于无肥对照, 各处理以 75% 沼液替代比例分 3 次施入(N_{75%})处理的水稻生物量和产量为最高, 其生物量及产量分别比单施化肥处理提高 2.7% 和 7.5%; 而小麦生物量和产量以 50% 沼液替代比例(N_{50%})处理最高, 其生物量和产量比单施化肥处理分别提高 15.9% 和 7.8%。沼液化肥配施对稻麦的增产作用主要体现在提高水稻与小麦总穗数及穗粒数上; 各处理水稻、小麦的氮素累积量和氮素当季表观利用率分别以 75%(N_{75%})和 50%(N_{50%})替代比例为最高; 在 50%~100% 替代比例内沼液分次施用, 水稻、小麦氮肥农学效率、偏生产力都高于化肥处理。水稻、小麦不同器官的氮分配比例显示, 沼液配施化肥促进氮素向籽粒转移; 相同沼液替代比例下, 沼液分次施用水稻、小麦的产量、氮素累积量及氮素利用率均较基肥一次性施入高。稻、麦根、叶部磷含量分别以 N_{75%}和 N_{100%} 处理最高。以上表明稻麦配施 50%~75% 的沼液分 3 次施用, 可获得与纯化肥处理相当的产量, 且在一定程度上提高稻麦氮素利用率。

关键词:猪粪沼液; 稻麦轮作; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S147.5

目前化肥、农药等化学投入品的过量使用带来诸如土壤板结、酸化加速及氮磷流失等问题, 已为全球关注。因此, 很多研究者在兼顾水稻、小麦高产与提高氮肥利用率及减少氮素流失的施肥技术方面做了很多工作^[1-3]。

沼液是人畜废弃物及农作物秸秆等厌氧发酵后残留的液体, 含有丰富的腐殖质等有机物质和氮、磷、钾等大量元素及各种氨基酸、有机酸、抗菌物质等生物活性物质, 对提高蔬菜和水果产量及品质具有显著效果^[4], 且沼液对提高地表温度、增强肥效上也有较好作用^[5-6]。20 世纪以来, 沼液替代化肥试验陆续开展, 但到目前为止, 沼液作为肥料使用主要偏重于经济作物, 将其作为肥料在大田粮食作物生产中应用的研究还很少^[7], 在太湖地区利用沼液与化肥配施来保持稻麦产量和减少氮肥对环境污染的研究还未见报道。本文在江苏肥料投入量较大的环太湖地区, 通过连续 2 年的田间试验, 研究稻麦轮作系统中等氮量条件下, 沼液与化肥配合施用及沼液不同施用方式对水稻、小麦产量和氮素吸收、利用的影响, 为稻麦的可

持续生产以及沼液的科学处理和合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为镇稻 10 号, 小麦品种为扬麦 13 号; 供试沼液(digested pig slurry, DPS)取自宜兴市坤兴生态农业公司的厌氧发酵罐(容积为 1 000 m³), 原料为猪粪尿及冲圈水, 反应器类型升流式固体反应器(up-flow solids reactor, USR), 已正常运行 3 年。沼液主要成分和化学性质如下: 总氮 880 mg/L, 铵态氮(NH₄⁺-N)718 mg/L, 总磷 37.6 mg/L, 总钾 590 mg/L, pH 7.83, 化学需氧量(COD_{Cr})3 737 mg/L。

1.2 试验方法

试验自 2008 年水稻移栽开始至 2011 年小麦收获截止, 进行了 3 年共 6 季的大田施用猪粪沼液试验, 本文以 2008—2009 年水稻和小麦各两季的生长及产量数据进行分析。

试验在江苏省宜兴市高塍镇红塔村(31°26'N,

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD17B06)和公益性行业(农业)科研专项(200903011-01)资助。

* 通讯作者(czhizhou@hotmail.com)

作者简介: 黄红英(1967—), 男, 湖南安东人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事农业废弃物资源化研究。E-mail: sfimicrolab@aliyun.com

119°47'E)进行。供试土壤为黄泥土, 0 ~ 20 cm 土层土壤基本理化性质如下: pH6.23, 有机质 16.2 g/kg、全氮 1.23 g/kg、全磷 0.45 g/kg。

试验设 8 个处理, 分别为: 对照(CK)、100% 尿素氮(NPK)、25% 沼液氮+75% 尿素氮(N_{25%})、50% 沼液氮+50% 尿素氮(N_{50%})、75% 沼液氮+25% 尿素氮(N_{75%})和 100% 沼液氮(N_{100%}), 以及 50%(N_{50%T})和 75%(N_{75%T})沼液氮一次性作基肥施入处理。除不施肥的对照(CK)处理外, 其他各处理的施氮总量相同, 稻季和麦季均为 N 240 kg/hm²。各处理肥料施用详情见表 1。由于沼液中还含有大量的磷和钾, 为使各追肥处理的氮磷钾用量一致, 除 CK 和 NPK 处理外的其他各处理在施用尿素作为氮源外, 根据不同处理沼液带入磷钾量, 以添加过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂·H₂O)和氯化钾(KCl)作为磷和钾的补充。每个处理 3 个重复, 24 个田间试验小区按随机区组排列, 每个小区面积为 25 m²。稻麦田间管理均按当地一般农田管理方式进行。

1.3 测定项目与方法

水稻、小麦成熟后调查穗数、穗粒数、千粒重以及秸秆重量。每个小区实收 4 m² 进行产量测定。植株全氮分析方法为 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 靛酚蓝比色

法; 植株全磷分析采用钼兰比色法。土壤基本性状分析按常规方法^[8], 沼液中养分及 COD_{Cr} 的测定参照废水监测分析方法^[9]。试验数据均采用 Excel 进行处理, 并用 SPSS 13.0 软件进行方差分析和显著性检验, 多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 施用沼液对稻麦两季总产量及其产量构成的影响

表 2、3 为不同施肥处理稻、麦产量及构成因素比较, 结果表明, 沼液化肥配施稻、麦的产量、生物量均高于 CK 处理, 以 75% 沼液比例处理分 3 次施入(N_{75%})处理的水稻生物量和产量为最高, 其生物量比 CK、NPK 处理提高了 29.6%、2.7%, 产量分别提高了 26.3% 和 7.5%。单纯施沼液的 N_{100%} 处理水稻生物量和产量也显著高于 CK 处理(P<0.05), 但和 NPK 处理差异不显著。小麦生物量和产量均以 N_{50%} 处理最高, 其生物量和产量分别为 CK 处理的 3.1 倍和 3.2 倍; 生物量和产量比 NPK 处理分别提高了 15.9% 和 7.8%。沼液作为基肥一次性施入, 其水稻、小麦产量均随替代比例的提高而降低, 以 N_{75%T} 处理降幅最大, 表明沼液作为基肥比例过大对水稻和小麦的产量不利。

表 1 试验处理代码、氮肥来源及其施用方式
Table 1 Treatment codes, sources of nitrogen and application processes in this study

处理代码	氮素来源	施用方法
CK	不施肥料	—
NPK	100% 尿素	分 3 次撒施: 基肥 40%, 分蘖(拔节)肥 25%, 孕穗肥 35%
N _{25%}	25% 沼液, 75% 尿素	分 3 次施入: 基肥 40%, 分蘖(拔节)肥 25%, 孕穗肥 35%; 化肥为撒施, 沼液计算体积后用塑料桶均匀撒施在农田
N _{50%}	50% 沼液, 50% 尿素	同 N _{25%} 处理
N _{75%}	75% 沼液, 25% 尿素	同 N _{25%} 处理
N _{100%}	100% 沼液	同 N _{25%} 处理
N _{50%T}	50% 沼液, 50% 尿素	沼液作为基肥一次性施入, 尿素按 NPK 处理的比例分 3 次施入
N _{75%T}	75% 沼液, 25% 尿素	同 N _{50%T} 处理

表 2 施用沼液对两季水稻总产量及其产量构成的影响
Table 2 Effects of anaerobically digested pig slurry application on yield and yield composition of rice

处理	地上部生物量(kg/hm ²)	产量(kg/hm ²)	产量构成		
			总穗数(×10 ⁴ 穗/hm ²)	每穗粒数(粒/穗)	千粒重(g)
CK	22 836 b	11 809 b	256 b	87 a	23.39 a
NPK	28 824 a	13 879 a	320 a	91 a	23.63 a
N _{25%}	28 920 a	14 475 a	339 a	87 a	23.38 a
N _{50%}	28 280 a	14 424 a	346 a	90 a	23.88 a
N _{75%}	29 592 a	14 918 a	330 a	94 a	23.39 a
N _{100%}	27 502 a	14 170 a	311 a	92 a	23.79 a
N _{50%T}	28 264 a	14 397 a	331 a	96 a	23.38 a
N _{75%T}	26 336 ab	12 718 ab	349 a	88 a	23.64 a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异在 P<0.05 水平显著, 下同。

表 3 施用沼液对两季小麦总产量及其产量构成的影响
Table 3 Effects of anaerobically digested pig slurry application on yield and yield composition of wheat

处理	地上部生物量(kg/hm ²)	产量(kg/hm ²)	产量构成		
			总穗数(×10 ⁴ 穗/hm ²)	每穗粒数(粒/穗)	千粒重(g)
CK	4 808 d	2 497 b	196 c	17 b	36.63 b
NPK	12 886 b	7 357 a	329 a	31a	39.94 a
N _{25%}	11 938 bc	6 985 a	312 ab	31 a	40.98 a
N _{50%}	14 932 a	7 928 a	317 ab	31 a	39.83 a
N _{75%}	12 686 bc	7 912 a	314 ab	31 a	38.71 a
N _{100%}	14 442 ab	7 570 a	290 ab	32 a	39.38 a
N _{50%T}	12 514 bc	6 165 a	261 b	31 a	40.70 a
N _{75%T}	9 554 c	6 292 a	285 ab	29 a	39.83 a

从水稻产量构成因素来看,化肥沼液配施处理水稻总穗数较 CK 和 NPK 处理高,N_{100%} 处理总穗数显著高于 CK 处理,但不及 NPK 处理。不同施肥处理的水稻千粒重和每穗粒数无显著差异。水稻产量与构成因子的关联度分析也表明(表 4),产量和总穗数显著相关,说明沼液化肥配施对水稻的增产作用主要体现在提高其总穗数上,这与沼液的一部分速效养分的供给,促进了水稻有效分蘖,进而提高了总穗数有关。与 CK 处理相比,化肥沼液配施处理小麦的总穗数、每穗粒数和千粒重显著高于 CK 处理,但与 NPK 处理无显著差异。小麦产量与产量构成因素的相关分析表明,小麦产量与总穗数和每穗粒数相关关系达极显著水平(表 4),说明各施肥处理主要通过增加总穗数和每穗粒数来增产。沼液的施用方式对稻麦总穗数、每穗粒数、千粒重也无显著影响(表 2、表 3)。

表 4 稻麦产量与产量构成因子之间的相关系数
Table 4 Correlation between yield and yield composition of rice and wheat

	总穗数	每穗粒数	千粒重
水稻产量	0.632*	0.610	0.262
小麦产量	0.939**	0.949**	0.669

注:*,** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。

2.2 施用沼液对水稻、小麦氮素吸收及利用的影响
2.2.1 不同施肥处理氮吸收量及氮肥利用率 稻麦植株地上部累积吸氮量和氮肥利用率结果见表 5。N_{75%} 处理水稻两季累积吸氮量最高为 340.9 kg/hm², N_{75%T} 处理吸氮量最低。沼液不同替代比例处理之间(N_{100%} 除外)水稻的吸氮量随沼液替代比例的增加而增加,这可能与沼液中的速效养分含量的增加有关。小麦两季累积吸氮量以纯沼液 N_{50%} 处理最高,并显著高于 NPK 处理,但是与 N_{100%} 处理无显著差异,N_{75%T}

表 5 不同处理地上部的累积吸氮量和氮肥利用率
Table 5 Nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer use efficiency under different treatments

作物	处理	两季累积吸氮量(kg/hm ²)	氮肥表观利用效率(%)	氮肥农学利用效率(kg/kg)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥生理利用效率(kg/kg)
水稻	NPK	308.4 bcd	17.2 bc	4.3 a	28.9 a	29.4 a
	N _{25%}	313.6 bc	18.3 b	5.6 a	30.1 a	30.1 a
	N _{50%}	324.5 ab	20.6 ab	5.4 a	30.0 a	26.3 a
	N _{75%}	340.9 a	24.0 a	6.5 a	31.1 a	27.1 a
	N _{100%}	306.5 cd	16.8 c	4.9 a	29.5 a	29.6 a
	N _{50%T}	320.9 bc	19.8 b	5.4 a	30.0 a	27.0 a
	N _{75%T}	294.3 d	14.3 c	3.9 a	26.5 a	13.1 b
	N _{100%T}	205.1 b	31.3 bc	10.1 a	15.3 a	32.7 bcd
小麦	NPK	188.5 bc	27.8 cd	9.4 a	14.6 a	33.6 bc
	N _{25%}	238.0 a	38.2 a	11.4 a	16.6 a	29.8 cde
	N _{50%}	212.3 b	32.8 b	11.3 a	16.5 a	34.4 b
	N _{75%}	230.6 a	36.6 a	10.6 a	15.8 a	28.9 de
	N _{100%}	184.6 c	27.0 d	7.6 a	12.8 a	28.3 e
	N _{50%T}	154.6 d	20.7 e	7.9 a	13.1 a	40.1 a
	N _{75%T}					
	N _{100%T}					

注:氮肥表观利用效率(%)=(施氮区地上部吸氮量-无氮空白区地上部吸氮量)/施氮量×100%;氮肥农学利用效率(kg/kg)=(施氮区产量-无氮空白区产量)/施氮量;氮肥生理利用效率(kg/kg)=(施氮区产量-无氮空白区产量)/(施氮区地上部吸氮量-无氮空白区地上部吸氮量);氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量/施氮量。

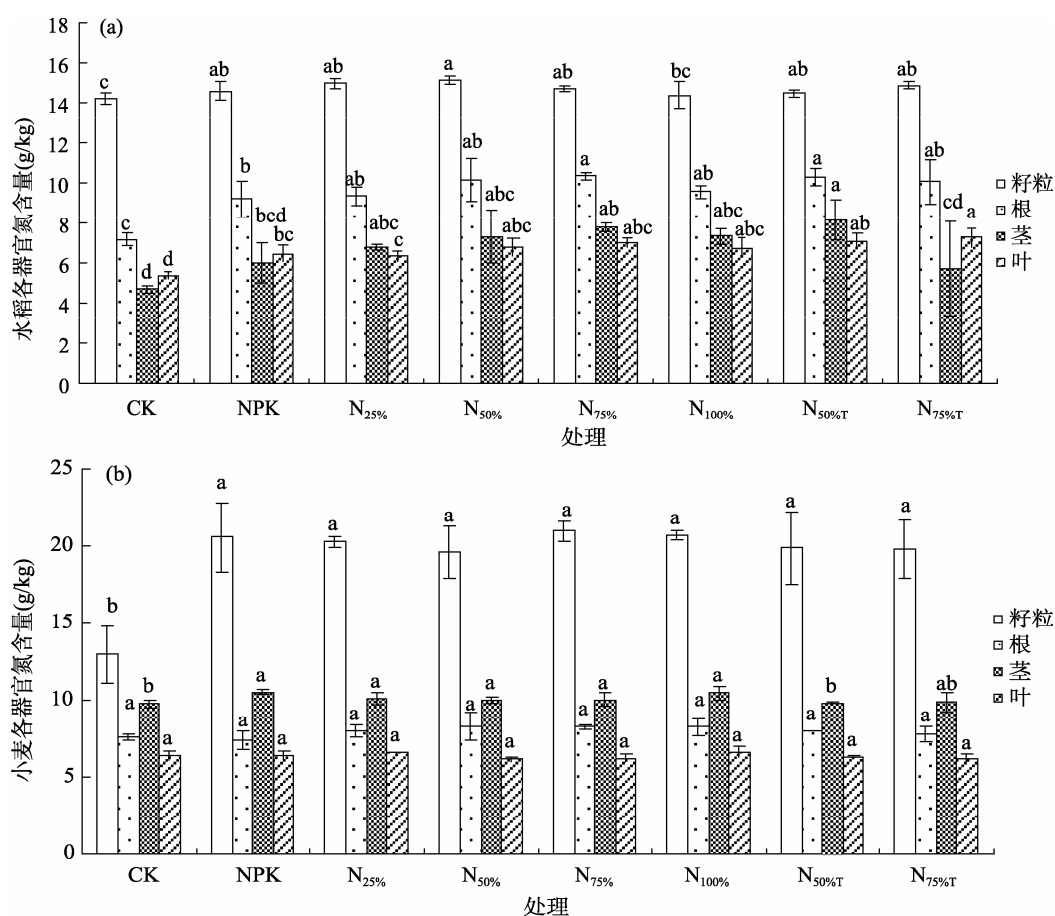
处理最低。从表 5 还可以看出,水稻的氮肥表观利用率、氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力均以 $N_{75\%}$ 处理最高, $N_{25\%}$ 处理氮肥生理利用效率最高。小麦氮肥表观利用率、氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力以 $N_{50\%}$ 处理最高, $N_{75\%T}$ 处理氮肥生理利用效率最高。在 25% ~ 75% 沼液替代比例内,小麦氮素表观利用率差异显著。不同沼液施用方式比较可以看出,沼液分次施用稻麦的累积吸氮量和氮素表观利用率均高于一次性施入处理。

2.2.2 不同施肥处理稻麦氮、磷分布 成熟期稻麦不同器官氮含量表明(图 1),各处理稻、麦籽粒含氮量均为最高,其次为茎、根,叶片中残留的 N 素最少。沼液化肥配合施用处理水稻籽粒的含氮量均高于 CK 处理,以 $N_{50\%}$ 处理最高,分别比 CK 和 NPK 处理高出 6.7% 和 4.0%,但沼液不同替代比例之间没有显著差异。水稻根、茎、叶的含氮量 CK 处理均为最低,含氮量最高的分别为 $N_{75\%}$ 、 $N_{50\%T}$ 、 $N_{75\%T}$ 处理,均显著高于 NPK 处理,说明沼液作为基肥一次性施入造成水稻营养生长旺盛,吸氮量增大。 $N_{100\%}$

处理水稻的根茎叶含氮量与 NPK 处理无显著差异。小麦籽粒含氮量以 $N_{75\%}$ 处理最高,并显著高于 CK 处理,但其他各处理间没有显著差异。与 CK 处理相比,沼液化肥配合并分次施用显著施用提高了小麦茎的含氮量,但与 NPK 处理相比没有显著差异。所有施肥处理的小麦根、叶的含氮量也没有显著差异。沼液分次施入小麦根、茎、叶、籽粒含氮量较一次性施入高,与 NPK 处理相当。

从图 2 可以看出, $N_{50\%}$ 、 $N_{100\%}$ 处理的稻麦籽粒含氮比例分别最大。无论水稻还是小麦,沼液和化肥配合施用的植株籽粒含氮比例均高于 CK 和 NPK 处理。沼液化肥配合施用各处理的小麦、水稻籽粒含氮比例平均比 CK 处理高出 10% 和 7%,比 NPK 处理高 2.0% 和 1.7%。

稻麦成熟期各器官磷含量见表 6。从表 6 可以看出,小麦籽粒、根、叶部的磷含量均以 $N_{100\%}$ 处理最高。各处理小麦籽粒和根含磷量差异较大,以沼液低替代比例 $N_{25\%}$ 、 $N_{50\%}$ 处理的籽粒含磷量最低,但根系中磷含量较高,显著高于 CK 处理;茎、叶磷含量差



(图中不同小写字母表示同一器官不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同)

图 1 水稻(a)、小麦(b)植株各器官含氮量

Fig. 1 Nitrogen contents in rice and wheat

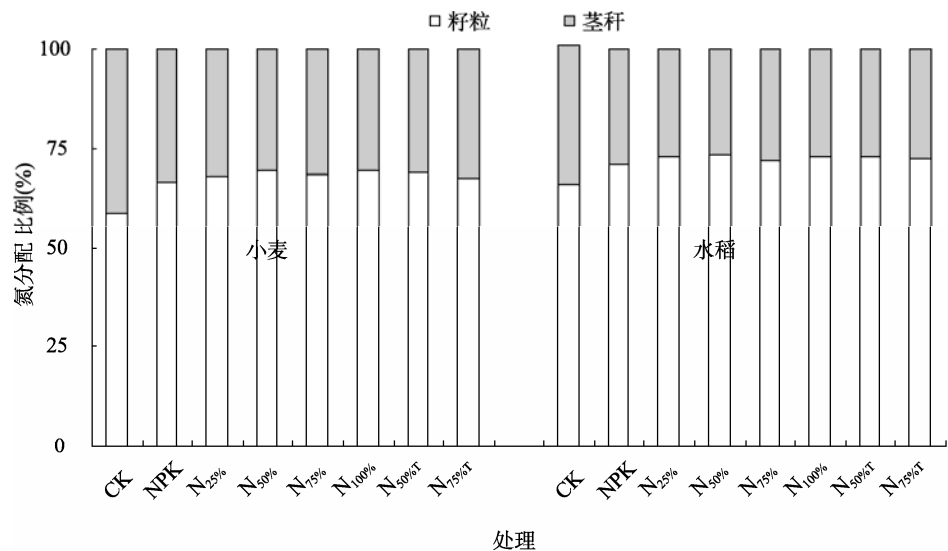


图 2 氮在小麦、水稻植株地上部器官的分配比例
Fig. 2 Nitrogen distributions in wheat and rice

表 6 稻麦各器官磷含量(g/kg)
Table 6 Phosphorus contents in rice and wheat

处理	小麦				水稻			
	籽粒	根	茎	叶	籽粒	根	茎	叶
CK	3.65 ab	0.37 c	0.37 a	0.53 a	2.64 a	0.63 a	0.69 c	0.82 a
NPK	3.46 bc	0.41 b	0.37 a	0.51 a	2.55 a	0.79 a	0.98 bc	0.74 b
N _{25%}	3.33 c	0.52 ab	0.45 a	0.49 ab	2.44 a	0.88 a	1.16 bc	0.81 a
N _{50%}	3.37 c	0.51 ab	0.36 a	0.48 ab	2.24 a	0.90 a	1.77 ab	1.00 a
N _{75%}	3.44 c	0.56 a	0.35 a	0.51 a	2.52 a	1.21 a	2.29 a	1.10 a
N _{100%}	3.72 a	0.57 a	0.39 a	0.54 a	2.34 a	0.80 a	1.14 bc	0.77 a
N _{50%T}	3.53 abc	0.50 ab	0.30 a	0.49 ab	2.48 a	0.99 a	1.50 abc	0.93 a
N _{75%T}	3.48 bc	0.39 c	0.33 a	0.50 ab	2.62 a	1.15 a	1.10 bc	0.94 a

异较小。水稻根、茎、叶磷含量则以 N_{75%} 处理最高，但各处理间籽粒和根磷含量无显著差异；沼液高替代比例 N_{50%}、N_{75%} 处理的茎、叶含磷量显著高于 NPK 处理。沼液两种施用方式对稻麦籽粒磷的吸收无显著影响。

3 讨论

3.1 施用沼液对稻麦产量及其构成的影响

沼液中含有大量的速效养分，特别是铵态氮占总氮量的 70% 以上^[10]。同时其水溶性有机质含量也很高，可作为能源为土壤微生物利用，促进其对底物中有机氮的分解^[7]，因此在养分供应上可实现缓急相济。研究表明，冬小麦的返青期施用沼液可以明显促进冬小麦的增长和干物质的积累，并显著提高产量，增产可达 23.3%^[11]。Evens 和 Smith^[12]利用猪、牛粪为原料发酵产生的沼液及沼渣来种植玉米，结果表明沼液不仅能促进玉米的生长而且提高玉米产量。汪吉

东等^[13]在等氮下，追施水葫芦沼液比化肥更加促进了茼蒿的生长和养分吸收，并缩短茼蒿的生长期，提高其商品率，表明同等条件下，沼液配施化肥其效果要好于单施化肥处理。目前国内外有很多研究针对不同沼液与无机肥配施比例对作物产量的影响，多数研究者认为并非沼液所占比例越高越好，而是可能存在最佳比例^[7]。本试验也有相似的结果，稻麦最高产量均出现在中等替代量上(水稻 N_{75%} 处理，小麦 N_{50%} 处理)，沼液添加比例过多或过少均不利于作物的增产，这种结果在其他作物也有相同表现^[4,14-15]。沼液分次施用对稻麦的增产效果比一次性施用好，这可能是因为沼液以速效养分为主，其氮磷钾养分释放主要集中在前期，后期逐渐减少^[15]，在植株生育前期沼液施用量过大，导致作物营养生长旺盛，后期贪青晚熟，严重影响穗数和粒数，产量下降^[16]。

3.2 施用沼液对氮素吸收、利用及分配的影响

如前所述，沼液中既含有大量的速效养分，其可

溶性有机碳又能提高稻麦植株根际土壤微生物数量和酶活性,能刺激土壤微生物活动^[7],从而固定部分化学氮,将作物来不及吸收利用的部分氮素转化为有机氮,当作物需肥量增加时,配施的有机碳已消耗完,微生物群体就释放出所固定的氮素供作物生长所需^[17]。本研究中,小麦单施沼液的 $N_{100\%}$ 处理氮素表观利用率较高,并与 $N_{50\%}$ 处理无显著差异,可能的原因是,沼液中的氮素主要以铵态氮的形式存在,沼液替代比例的增加导致施入后土壤湿度较大,一方面减少了氮挥发,另一方面不利于土壤硝化作用的进行,进而减少了氮素的损失^[18]。而在稻田系统中消解沼液,尤其是单施沼液处理,水稻的氮素利用率最低,这可能是因为随着沼液施用量的增加,稻田水面铵的浓度增大,加重了氮挥发,导致氮损失,因而降低了氮素利用率。姜丽娜等^[16]研究表明,稻田氮挥发量占施用沼液氮量的 13% 以上。国内外也有研究表明施用畜禽废水后氮挥发高于全化肥处理,氮挥发随着废水用量的增加而提高^[19-20]。此外,本研究中, $N_{50\%}$ 处理的水稻以及 $N_{75\%}$ 处理的小麦籽粒含氮量最高,与杨长明等^[21]的结果一致。有机无机肥配施可明显提高稻麦植株中后期,尤其是灌浆期植株将吸收的氮素从营养器官有效地转运到籽粒中是氮素利用效率高的重要原因之一^[22]。稻、麦化肥配施 50%~75% 沼液处理能促进其生长和氮素吸收利用,表明该施肥方式和配比在本试验中获得了较好的效果。相对于纯沼液处理,沼液用量减少后,被土壤吸持的比例增加,减少了养分流失,沼液的利用率得到大幅度提高^[23],是较好的稻麦沼液施用比例和施用方式。当然,本试验中,与纯化肥相比,不同沼液化肥配施比例稻麦产量均未显著提高,说明在该施肥方案的基础上,如何继续改进沼液施用方法和施用量,降低化肥施用量,有待进一步研究。

参考文献:

[1] Phongpan S, Mosier AR. Effect of crop residue management on nitrogen dynamics and balance in a lowland rice cropping system[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66: 133-142

[2] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 李冬初, 宝川靖和, 八木一行. 有机无机肥配施对稻田氮挥发和水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 51-56

[3] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 谢小立. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1 109-1 113

[4] 徐卫红, 王正银, 王旗, 欧阳束, 陈彩范. 沼气发酵残留物对蔬菜产量及品质影响的研究进展[J]. *中国沼气*, 2005, 23(2): 27-29

[5] Moller K, Stinner W. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30: 1-16

[6] Terhoeven-Urselmans T, Scheller E, Raubuch M. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42: 297-302

[7] 冯伟, 管涛, 王晓宇, 朱云集, 郭天财. 沼液与化肥配施对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1 007-1 012

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000: 30-165

[9] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002

[10] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 马艳, 朱瑾. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 27(1): 291-296

[11] 陈楠, 高同国, 姜峰, 李宝珍, 杨金水, 庞昌乐, 袁红莉. 高效稳定沼液营养液对冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *中国沼气*, 2009(4): 47-51

[12] Evens SD, Smith RE. Effects of solid and liquid beef mature and liquid hog mature on soil characteristics and on growth yield and composition of corn[J]. *Environmental Quality*, 1997, 6: 361-368

[13] 汪吉东, 马洪波, 高秀美, 许仙菊, 宁运旺, 张辉, 张永春. 水葫芦发酵沼液对紫叶莴苣生长和品质的影响[J]. *土壤*, 2011, 43 (5): 787-792

[14] 刘小刚, 李丙智, 张林森, 金会翠, 冯存良. 追施沼液对红富士苹果品质及叶片生理效应的影响[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(3): 105-108

[15] 赵金华, 蒋卫杰, 余宏军. 沼液、化肥配施对西瓜产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (4): 53-56

[16] 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 李艾芬, 钱士明, 符建荣, 汪建妹. 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): 1 328-1 336

[17] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 黄启为, 徐阳春, 沈其荣, 杨兴明. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 97-106

[18] 黄红英, 曹金留, 常志州, 靳红梅. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 35(11): 2 353-2 361

[19] Hou H, Zhou S, Hosomi M. Ammonia emissions from anaerobically-digested slurry and chemical fertilizer applied to flooded forage rice[J]. *Water, Air, & Soil Pollut ion*, 2007, 183(1): 37-48

- [20] Smith KA, Jackson DR, Misselbrook TH. Reduction of ammonia emission by slurry application techniques[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(3): 277–287
- [21] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 欧阳竹. 不同肥料结构对水稻群体干物质生产及养分吸收分配的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(4): 199–204
- [22] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 徐阳春, 沈其荣. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 616–621
- [23] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 常志州. 猪粪沼液施用对土壤氮挥发及玉米产量和品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(2): 163–168

Effects of Digested Pig Slurry Application on Yields, Nitrogen and Phosphorous Uptakes by Rice and Wheat

HUANG Hong-ying^{1,2}, CAO Jin-liu³, CHANG Zhi-zhou^{1,2*}, CAO Yun^{1,2}

(1 *Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;*

2 *Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China;*

3 *Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China)*

Abstract: A two-year field experiment under rice/wheat rotation system in Tai Lake region in Jiangsu Province of China was carried out to study the effect of digested pig slurry (DPS) on yields and nitrogen use efficiency of rice and wheat. The results showed that the treatments of pure chemical fertilizer (NPK) application and combined use of chemical fertilizer and DPS obtained significantly higher biomass and grain yields of rice and wheat than the no fertilizer control (CK). The treatment of N_{75%} (75% N substituted) and N split application had the highest rice biomass and yield, which were 2.7% and 7.5% higher than the NPK treatment, respectively. The highest wheat biomass and yield, which were 15.9% and 7.8% higher than the NPK treatment, was found in the treatment of N_{50%} (50% N substituted). The increased yields of rice and yield by combined use of DPS and inorganic fertilizer were mainly attributed to the increased numbers of panicle and filled grain. The highest N accumulations and N recovery efficiencies (NREs) of rice and wheat occurred in the treatments of N_{75%} and N_{50%} (50% N substituted), respectively. In the range of 50%–100% N substitution combined with N split application, both agronomic nitrogen use efficiency and partial factor of productivity of N fertilizer of rice and wheat were higher than the NPK treatment. N distribution proportion between different rice and wheat organs showed that combined use of DPS and inorganic fertilizer promoted N transfer into grains. Within the same substitution ratio, split application of DPS enhanced the grain yield, N accumulation and N use efficiency of rice and wheat than base application. The highest P contents in roots and leaves of rice and wheat appeared in the treatments of N_{75%} and N_{100%}, respectively. The best N substitution ratios of between 50% and 75% by DPS for rice and wheat could promote crop growth and N uptake and split fertilization was more suitable than base fertilization when DPS and chemical fertilizers were combined use in rice and wheat.

Key words: Anaerobically digested pig slurry, Rice-wheat rotation system, Grain yield, Nitrogen use efficiency