

成都平原农业废弃物施用下稻田田面水氮磷动态变化特征

李瀚^{1,2}, 邓欧平^{1,3}, 胡佳^{1,2}, 邓良基^{1,2,3*}, 张世熔^{1,2,3}

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.四川农业大学生态环境研究所, 成都 611130; 3.四川省土壤环境保护重点实验室, 成都 611130)

摘要:为合理利用农业废弃物, 设置不同量的废弃物还田处理, 以期通过研究稻田田面水中氮素和磷素的动态变化探明废弃物施用下面源污染风险。结果表明:总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)、铵态氮(NH₄⁺-N)以及硝态氮(NO₃⁻-N)在各施肥处理下均表现为先升后降的趋势, 施肥后 2~3 d 达到峰值, 之后迅速下降; 各处理下各形态氮含量在施肥后 21 d 内差异趋同。总磷(TP)、可溶性总磷(DTP)在施肥后 1 d 达最大, 之后迅速下降, 猪粪施用处理的田面水 TP、DTP 含量在施肥后 5~7 d 明显回升。与纯化肥相比, 加施全量麦秆对田面水中各形态氮、磷含量及分配无显著影响; 高量猪粪施用会显著降低田面水 NH₄⁺-N 含量, 降低氨挥发潜能, 显著提高各形态磷含量, 延长磷素流失风险期, 增加磷素流失风险; 废弃物施用对水稻产量及糙米磷含量无显著影响。综合考虑废弃物施用下的环境风险与粮食生产, 成都平原麦秆全量还田模式下水稻季每 667 m² 田的猪粪承载量不宜超过 3 头猪 0.5 年的排泄量。

关键词:农业废弃物; 田面水; 氮; 磷; 动态变化

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0485-09 doi:10.11654/jaes.2015.03.010

Dynamics of Nitrogen and Phosphorus in Paddy Field Water Under Agricultural Residue Applications in Chengdu Plain

LI Han^{1,2}, DENG Ou-ping^{1,3}, HU Jia^{1,2}, DENG Liang-ji^{1,2,3*}, ZHANG Shi-rong^{1,2,3}

(1.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Institute of Ecological and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3.Key Laboratory of Soil Environmental Protection in Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: Applying agricultural residues has improved soil fertility and thus crop yields. However, little information is available about the risk of nitrogen and phosphorus pollution caused by agricultural residue applications in paddy fields. In this study, an experiment with three agricultural residue application rates was conducted to study the dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field water. The concentrations of total N(TN), dissolved total N(DTN), ammonium(NH₄⁺-N) and nitrate(NO₃⁻-N) under different treatments all reached their peak values 2~3 days after applying residues, and then decreased rapidly. The concentrations of different forms of N showed no significant difference between different treatments 21 days after treatments. The concentrations of total P(TP) and dissolved P(DTP) under different treatments attained their peak values on the 1st day after treatments, and then declined. However, TP and DTP significantly increased 5~7 days after swine manure treatment. In comparison with chemical fertilizer, wheat straw did not have significant effects on the concentrations of different N and P forms. High rates of swine manure significantly decreased ammonium concentrations and ammonia volatilization potential in paddy field water, but significantly enhanced P loss. The applications of agricultural residues had no significant effects on rice yields and P contents in brown rices. Considering food production and environmental risks resulted from applying agricultural residues in Chengdu Plain, we suggest that under the whole wheat straw returning the paddy field carrying capacity for swine manure per 667 m² during rice growing season should be less than the amount of excretion by three swines during half year.

Keywords: agricultural residues; paddy field water; nitrogen; phosphorus; dynamic changes

收稿日期: 2014-11-01

基金项目: 十二五国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18)

作者简介: 李瀚(1991—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境可持续。E-mail: 1252751427@qq.com

* 通信作者: 邓良基 E-mail: auh6@sicau.edu.cn

水稻是我国最重要的粮食作物,其产量是衡量农业发展水平的重要标准^[1]。成都平原是四川省粮食主产区^[2],在人口膨胀的压力下形成了以高投入、高产出、高污染为主要特征的传统生产模式。2009年四川省化肥施用量已超过 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远超过发达国家的安全上限 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[3],农业生产引起的面源污染已成为水污染的最重要来源之一。同时,农业生产过程中产生数量巨大的废弃物,随意丢弃或者排放到环境中,会使一部分“资源”变为“污染源”,对生态环境造成极大的影响^[4]。废弃物再利用对提高资源利用效率、缓解我国经济发展过程中的资源压力、减少环境污染、实现可持续发展具有重要意义^[5-6]。前人的研究肯定了废弃物施用的增产效应和改善土壤理化性状的效果^[7-9],对于稻田氮磷素损失可能造成面源污染风险的研究多集中于化肥施用条件下,针对农业废弃物施用下的研究还鲜见报道。本研究基于成都平原水稻土稻麦轮作区,通过田间定点试验,以秸秆、猪粪施用处理为研究对象,分析了稻田田面水氮磷养分的分配特征及动态变化特征,以期寻找出农业废弃物施用条件下控制田面水氮磷养分流失的关键时期及措施,为农业废弃物的资源化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2013年4月至9月在成都市都江堰天马镇进行,试验地属岷江灰色冲积物发育而成的淹育型水稻土,土壤耕作层(0~20 cm)基本理化性状:有机质 $30.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $2.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $32.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $8.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $106.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $3.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、铵态氮 $0.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH6.15。2014年4月至9月在成都市崇州杞泉镇进行第2次试验,试验地属渗育黄潮田属黄泥田,土壤耕作层(0~20 cm)基本理化性状:有机质 $25.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $2.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $1.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $28.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $10.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $128.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $2.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、铵态氮 $0.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH6.53。两地均为成都平原主要粮食产区,属中亚热带湿润气候,年均气温 $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $1000\sim 1200\text{ mm}$,年均无霜期 280 d 以上。

1.2 试验设计及处理

通过2013年4月对都江堰市崇义镇、天马镇、石羊镇、聚源镇等四个主要水稻种植区的施肥情况调查可知:农户习惯施肥为尿素(纯N含量46%),折合纯N为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;过磷酸钙(P_2O_5 含量12%),折合

P_2O_5 为 $75\sim 90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;氯化钾(K_2O 含量60%),折合 K_2O 为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;磷、钾肥均作为基肥一次性施入,氮肥分基肥(70%)、孕穗肥(30%)两次施入。同时,从位于天马镇的成都德弘农业有限公司了解到,因猪的种类、体重的不同,猪粪日排量为 $1.5\sim 3\text{ kg}$ 不等,鲜猪粪含水量为78%(未与尿混合)。经干湿分离后,2013年试验用猪粪含水量55.46%、全N 0.68%、 P_2O_5 1.81%、 K_2O 0.31%;2014年试验用猪粪含水量58.33%、全氮0.59%、 P_2O_5 1.62%、 K_2O 0.47%。

试验共设5个处理,如表1所示:CK(空白试验,不施任何肥)、CF(当地常规施肥,考虑到试验地土壤有效磷含量较低,选择高施磷量)、T1(麦秆全量还田+当地常规施肥)、T2(麦秆全量还田+低量猪粪)、T3(麦秆全量还田+高量猪粪)。考虑到7月份雨季开始,追肥极易造成养分径流损失,为保证试验结果的可比性,将化肥、猪粪均作为基肥一次性施入。供试水稻品种为F优498,大田育秧。2013年种植日期为4月20日,移栽日期为5月30日;2014年种植日期为4月19日,移栽日期为5月26日。每穴种植3株,收获日期分别为2013年9月28日、2014年9月26日。

试验小区为 $5\text{ m}\times 6\text{ m}$,随机区组排列,三次重复。小区田埂筑高 20 cm ,用塑料薄膜包裹并牵至犁底层,各小区均设有相互独立的排灌系统,以减少田间侧渗和串流,其他田间管理与当地农户相同。水稻移栽后,保持田面水层 $5\sim 12\text{ cm}$,田面水低于 5 cm 时,在傍晚进行灌溉。施肥后21 d内气温变化如图1。

1.3 采样与测定

在基肥施入后1、2、3、5、7、9、15、21 d的上午

表1 试验设计
Table 1 Design of experiment

年份	处理	麦秆/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	猪粪/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	化肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		
				N	P_2O_5	K_2O
2013	CK	—	—	—	—	—
	CF	—	—	180	90	90
	T1	6000	—	180	90	90
	T2	6000	11 250	128.3	(90.7)	76.5
	T3	6000	22 500	75.4	(181.4)	70.8
2014	CK	—	—	—	—	—
	CF	—	—	180	90	90
	T1	6000	—	180	90	90
	T2	6000	11 250	147.7	(89.3)	64.3
	T3	6000	22 500	115.4	(178.5)	38.5

注:括号内数值表示猪粪施用已带入的 P_2O_5 含量。

Note: Values in the brackets were amount of P_2O_5 from swine manure applied.

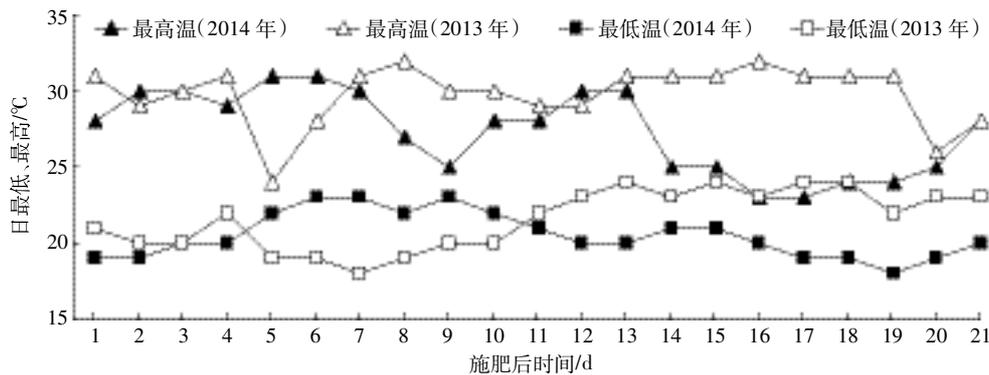


图1 施肥后 21 d 内气温变化

Figure 1 Variation of air temperature during 21 d after treatments

8:00—9:00 采集各处理田面水样, 采样时用温度计测量各小区田面水温度(表 2), 每小区选取 5 个子样点, 采用 100 mL 医用注射器, 在不扰动土层的前提下抽取中上层表面水, 混合后分取 2 份各 250 mL 冷冻保存, 分别作为待测样和备用。水样带回实验室, TN(总氮)采用过硫酸钾(进口)氧化-紫外分光光度法测定;DTN(可溶性总氮)先经 0.45 μm 滤膜过滤, 再采用过硫酸钾(进口)氧化-紫外分光光度法测定;NO₃-N 采用紫外分光光度法测定;NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定;TP(总磷)采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定;DTP(可溶性总磷)先经 0.45 μm 滤膜过滤, 再采用过硫酸钾(进口)氧化-钼蓝比色法测定。基础土样 pH 采用电位法(液:土=5:1);有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法;全氮采用 H₂SO₄ 消煮-半微量开氏法;铵态氮采用氯化钾浸提(液:土=5:1)-靛酚蓝比色法;硝态氮采用氯化钾浸提(液:土=5:1)-紫外分光光度法;全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法;有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法;全钾采用 NaOH

熔融-火焰光度法;速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法。各小区水稻单打单收, 分别统计水稻产量;H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮糙米, 凯氏定氮法测定氮含量, 钼锑黄比色法测定磷含量。

1.4 计算方法及数据处理

$$\text{DON}=\text{DTN}-(\text{NH}_4^+-\text{N})-(\text{NO}_3^--\text{N})$$

$$\text{PN}=\text{TN}-\text{DTN}$$

$$\text{PP}=\text{TP}-\text{DTP}$$

式中: DON 为可溶性有机氮含量, mg·L⁻¹; DTN 为可溶性总氮含量, mg·L⁻¹; TN 为总氮含量, mg·L⁻¹; PN 为颗粒态氮含量, mg·L⁻¹; PP 为颗粒态磷含量, mg·L⁻¹; TP 为总磷含量, mg·L⁻¹; DTP 为可溶性总磷含量, mg·L⁻¹。

运用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS Statistics 16.0 软件进行统计分析、作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下田面水不同形态 N 素分配特征

两年的试验结果表明(表 3、表 4), 田面水中各形态 N 素含量均为废弃物施用处理最高, 其中 PN 含量随废弃物施用量的增加而增加, T3 处理下 PN 含量显著高于其他处理; 与 CF 相比, 废弃物施用对田面水 NO₃-N 含量无显著影响。各形态 N 素分配比例则不同, 与 CF 处理相比, T1 处理对各形态 N 素分配比例均无显著影响, T3 处理显著降低 DTN/TN、NH₄⁺-N/TN 比例。

2.2 不同处理下田面水不同形态 N 素动态变化

如图 2 所示, 田面水 TN 含量在两年的试验中均呈现出先增后减的变化趋势, 各处理在施肥后 2 至 3 d 达到峰值, 随后持续下降, 至施肥后 15 d, 废弃物施用处理下田面水 TN 含量仍显著高于 CK 处理; 至施

表 2 采样时田面水温度(°C)

Table 2 Water temperature in paddy fields during sampling(°C)

年份	处理	施肥后时间/d								
		1	2	3	5	7	9	15	21	
2013	CK	20.3	20.9	23.0	23.3	22.3	21.9	23.0	22.7	
	CF	20.7	20.0	22.8	23.5	22.4	21.4	23.0	22.7	
	T1	20.5	21.2	22.8	23.8	22.1	21.7	22.5	22.6	
	T2	21.0	21.2	22.5	23.0	22.3	21.2	22.8	23.0	
	T3	21.2	21.5	22.2	24.0	23.0	21.3	23.2	22.9	
2014	CK	19.7	20.5	21.5	21.9	22.4	21.5	20.7	20.9	
	CF	19.8	20.7	21.6	21.7	22.1	21.3	21.0	20.7	
	T1	20.3	20.9	22.0	21.7	22.6	21.3	20.6	20.7	
	T2	20.0	20.2	21.0	22.3	23.0	21.8	21.0	20.9	
	T3	19.6	21.1	21.8	22.4	22.7	21.6	20.8	21.1	

表3 不同处理下田面水不同形态 N 含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 3 Concentrations of different forms of N in paddy field water under different treatments($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

年份	处理	TN	DTN	DON	PN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
2013	CK	14.15±2.39d	7.18±0.72c	4.28±1.04c	6.96±1.82c	1.17±0.20b	1.73±0.51d
	CF	53.62±15.38bc	37.68±10.72ab	19.67±4.61a	15.94±7.64bc	2.66±0.63ab	15.35±4.30ab
	T1	62.68±6.39ab	42.33±4.64a	21.09±2.40a	20.35±2.38b	2.71±0.19ab	18.53±1.59a
	T2	50.99±3.77c	29.48±2.96b	11.77±0.42b	21.51±1.22b	4.70±1.87a	13.01±1.36b
	T3	74.03±10.57a	32.95±2.47b	21.58±3.14a	41.08±12.31a	4.23±1.68a	7.13±1.29c
2014	CK	7.22±1.28d	4.08±0.61b	2.52±0.54c	3.14±1.26d	0.72±0.38b	0.83±0.30c
	CF	53.57±5.63c	38.05±3.55a	20.08±2.84b	15.52±2.65c	3.95±1.07a	14.02±2.14a
	T1	62.52±7.24bc	37.49±10.43a	16.46±3.60b	25.03±3.35bc	4.62±2.10a	16.41±5.67a
	T2	68.73±1.23ab	42.26±3.08a	21.73±1.38ab	26.47±3.82b	4.66±1.02a	15.87±3.22a
	T3	75.98±10.51a	37.45±3.40a	26.92±4.63a	38.53±10.94a	2.97±0.49a	7.56±1.45b

注:表内同列数据后不同字母代表 5%水平下差异显著,所有值为该年 8 次测定数据的平均值。下同。

Note: Values followed by different letters in a column are significantly different at 5% level. Values were mean values of eight measurements during 1 Jun to 21 Jun for the year. The same below.

表4 不同处理下田面水不同形态 N 素分配比例(%)

Table 4 Ratios of different forms of N to total N in paddy field water under different treatments(%)

年份	处理	DTN/TN	DON/TN	PN/TN	$\text{NO}_3\text{-N/TN}$	$\text{NH}_4\text{-N/TN}$
2013	CK	51.32±4.86cd	30.03±2.63ab	48.68±4.86ab	8.50±1.95a	12.78±5.50b
	CF	70.85±8.25a	37.14±5.29a	29.15±8.25d	5.03±0.85b	28.67±2.22a
	T1	67.56±0.65ab	33.62±0.59a	32.44±0.65cd	4.33±0.15b	29.61±1.22a
	T2	57.77±0.97bc	23.12±0.95b	42.23±0.97bc	9.10±2.96a	25.55±2.61a
	T3	45.27±8.27d	29.90±7.86ab	54.73±8.28a	5.59±1.35b	9.79±2.43b
2014	CK	57.40±12.19ab	36.40±13.08a	42.60±12.19ab	9.72±3.51a	11.28±2.48b
	CF	71.13±2.67a	37.46±3.07a	28.87±2.67b	7.38±1.72ab	26.30±4.01a
	T1	59.19±10.42ab	26.15±2.98a	40.81±10.42ab	7.27±3.01ab	25.77±6.51a
	T2	61.53±5.13ab	31.65±2.54a	38.47±5.13ab	6.76±1.35ab	23.12±4.89a
	T3	49.98±8.63b	35.75±6.50a	50.02±8.63a	3.96±0.77b	10.27±3.49b

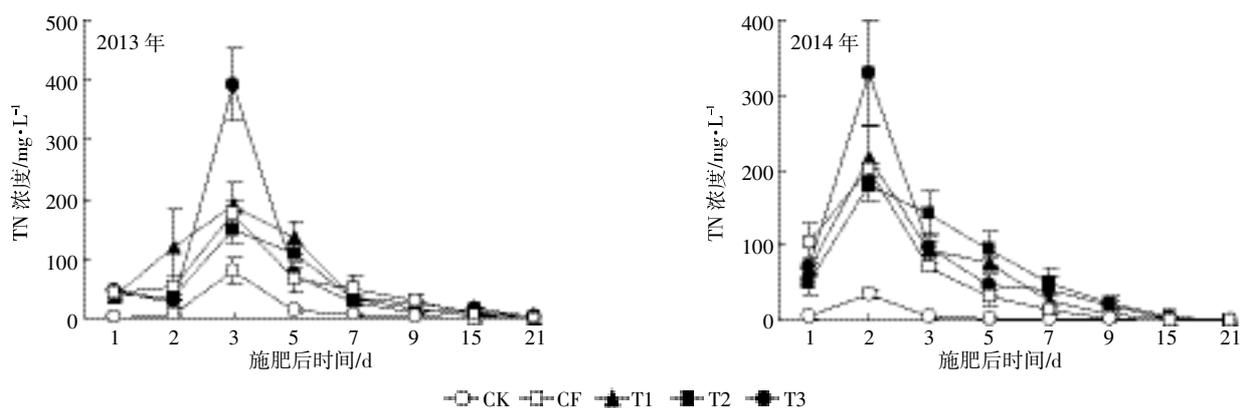


图2 不同处理下田面水 TN 含量动态变化

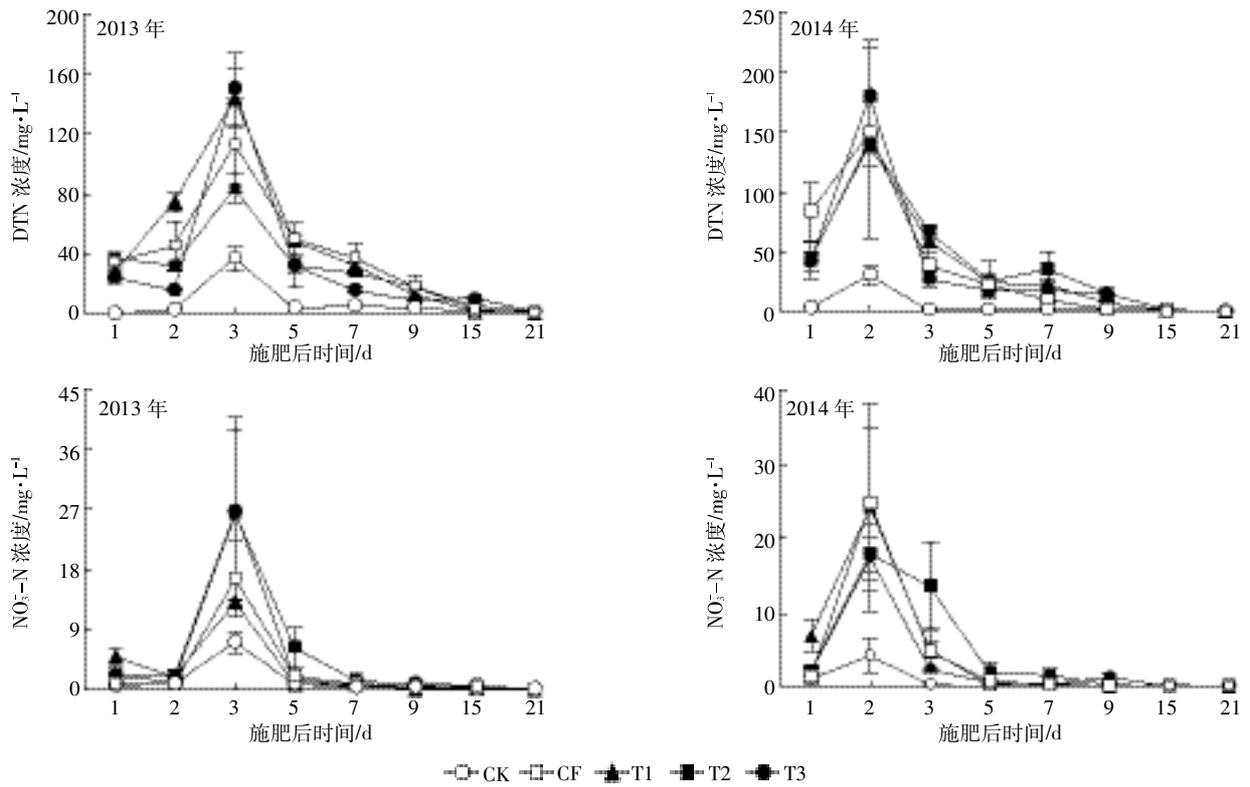
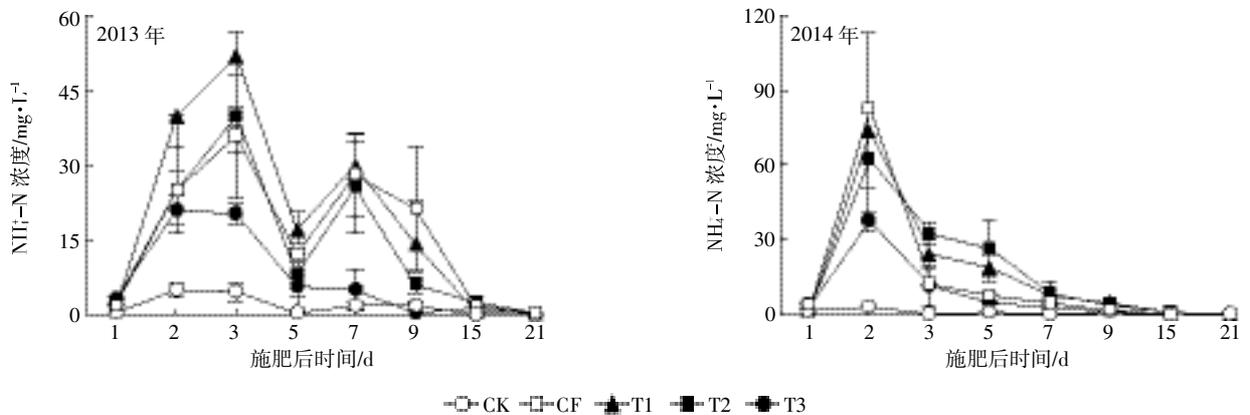
Figure 2 Dynamic changes of TN in paddy field water under different treatments

肥后 21 d,各处理差异趋同。

如图 3 所示,田面水 DTN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化与 TN 相同,也表现为先增后减,各处理在施肥后 2 至 3 d 达到峰值,之后持续下降,各处理在施肥后 15~21 d

内差异趋同。

2013 年, $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量呈“双峰”变化,在施肥后第 3 d 达到第一个峰值后下降,第 7 d 达第二个峰值(图 4)。这可能是因为 6 月 3、4 日气温的升高致使氨挥发加

图3 不同处理下田面水DTN、NO₃-N含量动态变化Figure 3 Dynamic changes of DTN and NO₃-N in paddy field water under different treatments图4 不同处理下田面水NH₄⁺-N含量动态变化Figure 4 Dynamic changes of NH₄⁺-N in paddy field water under different treatments

剧,田面水 NH₄⁺-N 浓度出现较大程度下降。三个废弃物施用处理在 2013 年施肥后第 1、2、3、5、7、9、15、21 d 的田面水 NH₄⁺-N 含量与其化肥施用量的相关系数分别为 -0.789*、0.910**、0.970**、0.764*、0.834**、0.804**、-0.274、0.103;2014 年各相关系数分别为 -0.377、0.916**、0.508、0.743*、0.486、0.767*、0.717*、0.815** (*为 0.05 显著水平,**为 0.01 显著水平),可见化肥施用量能在较大程度上影响田面水 NH₄⁺-N 含量。

2.3 不同处理下田面水不同形态 P 素分配特征

如表 5 所示,施肥后 21 d 内,田面水 TP、DTP 浓度的大小顺序为废弃物施用处理>纯化肥处理>空白处理;CF 与 T1 之间、T2 与 T3 之间的各形态 P 素含量及分配比例均无显著差异,T2、T3 处理下的田面水 TP、DTP、PP 浓度显著高于 CF 处理。

2.4 不同处理下田面水不同形态 P 素动态变化

试验表明,田面水 TP 与 DTP 变化呈相同趋势,

表5 不同处理下田面水不同形态P素含量及分配比例

Table 5 Concentrations and ratios of different forms of P in paddy field water under different treatments

年份	处理	TP/mg·L ⁻¹	DTP/mg·L ⁻¹	PP/mg·L ⁻¹	(DTP/TP)/%	(PP/TP)/%
2013	CK	0.44±0.25c	0.23±0.17c	0.21±0.10b	48.69±14.00c	51.31±14.00a
	CF	1.95±0.30b	1.30±0.20bc	0.65±0.14b	66.96±3.76ab	33.03±3.76bc
	T1	2.77±0.18b	2.14±0.12b	0.63±0.14b	77.30±4.21a	22.69±4.21c
	T2	6.24±1.54a	3.88±1.46a	2.36±0.74a	60.85±13.46bc	39.15±13.46ab
	T3	6.58±0.76a	3.80±0.59a	2.78±0.18a	57.57±2.67bc	42.43±2.67ab
2014	CK	0.36±0.24b	0.17±0.13c	0.19±0.12b	44.48±9.03b	55.52±9.03a
	CF	1.43±0.59b	0.76±0.32c	0.67±0.17b	52.86±1.55ab	47.14±1.55ab
	T1	1.80±0.70b	1.13±0.50bc	0.67±0.23b	62.55±3.92a	37.45±3.92b
	T2	5.08±2.16a	2.57±1.59a	2.52±0.61a	48.78±11.51b	51.22±11.51a
	T3	4.69±1.31a	2.21±0.76ab	2.48±0.42a	46.88±6.89b	53.12±2.67a

各处理在施肥后1 d到达峰值后迅速下降,CK、CF、T1处理下的田面水TP、DTP含量在施肥9 d后趋于稳定。两年试验结果(图5)表明,猪粪施用处理下的田面水TP和DTP含量在施肥后5~7 d出现明显回升,施肥后9~15 d达第二个峰值;至施肥后21 d,各处理下田面水TP、DTP含量差异趋同(除T3处理),T3处理下TP、DTP含量仍显著高于其他处理。

2.5 不同处理下水稻产量及糙米氮磷含量

由表6可知,与纯化肥相比,废弃物施用对水稻

产量及糙米磷含量并无显著影响,2014年猪粪施用处理下的糙米磷含量出现一定程度提高;废弃物施用处理间相比,T2处理下的水稻产量及糙米氮磷含量在两年的试验中均最高,其中,2013年的产量及糙米氮含量显著高于T1、T3处理。

3 讨论

氮、磷施肥水平分别是影响田面水中氮、磷浓度的主要因子,研究表明,施肥后9 d内的田面水TN、

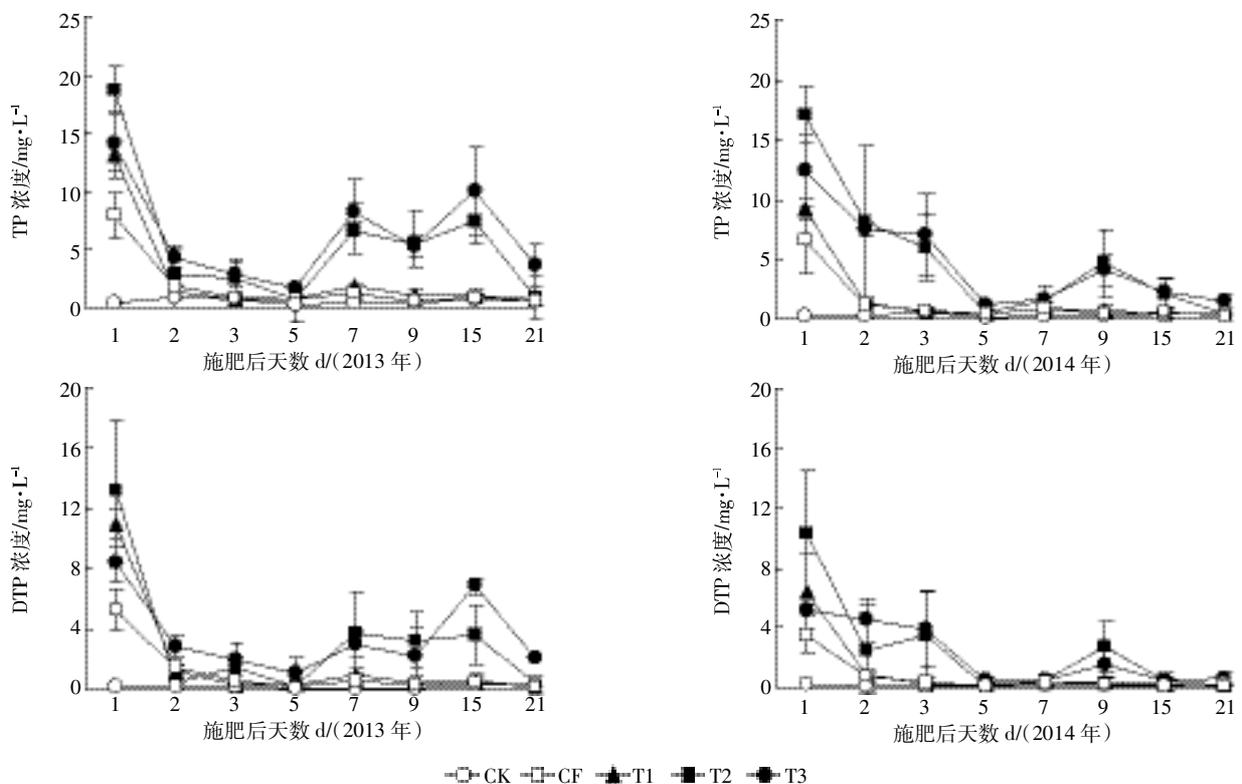


图5 不同处理下田面水TP、DTP含量动态变化

Figure 5 Dynamic changes of TP and DTP in paddy field water under different treatments

表6 不同处理下水稻产量及糙米氮磷含量

Table 6 Yields of rice grains and N and P contents in brown rice under different treatments

年份	处理	产量/kg·hm ⁻²	氮含量/mg·kg ⁻¹	磷含量/mg·kg ⁻¹
2013年	CK	4 806.4±240.7c	12.27±0.31c	1.67±0.05b
	CF	7 498.4±413.6ab	16.67±0.35a	1.90±0.06a
	T1	7 282.8±227.4b	15.13±0.60b	1.81±0.07a
	T2	7 607.7±614.6a	16.33±0.15a	1.89±0.02a
	T3	7 246.1±300.1b	15.33±0.61b	1.91±0.09a
2014年	CK	4 202.1±387.5b	11.82±0.95b	1.41±0.12c
	CF	7 835.7±883.5a	15.66±1.83a	1.77±0.09ab
	T1	6 922.9±461.3a	15.05±0.36a	1.72±0.07bc
	T2	7 142.7±869.1a	15.72±0.49a	2.08±0.29a
	T3	6 831.3±1 098.0a	15.49±0.78a	2.10±0.27a

注:表内同列数据后不同字母代表差异达5%显著水平。

Note: Values followed by different letters in a column are significant between treatments at the 5% level.

DTN、NH₄⁺-N、PN、DON 及施肥后 15 d 内的田面水 TP、DTP、PP 平均含量和施肥量呈极显著正相关关系^[10-12]。本试验两个猪粪施用处理(T2、T3)施氮量相同,T3处理的施磷量是T2的2倍,而T3处理下的田面水PN含量显著高于T2处理,TP、DTP、PP含量却无显著差异。这可能是因为PN包括有机碎屑、细菌和浮游植物成分^[13],高量猪粪自身就带入了更多的PN。另外在采集水样时也发现,高量猪粪处理的田面水中的浮游生物明显多于其他处理,氮水平对磷的释放存在一种激发作用^[14],高氮施入会显著提高田面水磷含量,而T2、T3处理施氮量不高,可能对磷的生物转化促进并不明显,其具体原因还有待进一步研究。

田面水NH₄⁺-N含量和温度是影响稻田氮挥发的主要因素^[15-17]。2013年,各处理在施肥后第5d的田面水NH₄⁺-N含量明显下降(图4),可能是因为第3、4d的高温加剧了氮挥发。施肥1d后,田面水NH₄⁺-N含量随猪粪施用量的增加而增加,2d后NH₄⁺-N含量随化肥施用量的增加而增加。这是因为猪粪本身含较高浓度NH₄⁺,施肥后1d猪粪施用处理的田面水NH₄⁺-N含量高于化肥处理,而化肥氮需在脲酶作用下转化为NH₄⁺^[18-19],故在随后的时间里,田面水NH₄⁺-N含量随化肥施用量的增加而增加,21d内三个废弃物处理间的NH₄⁺-N平均含量表现为T1>T2>T3(表3)。这说明在一定范围内用猪粪替代化肥可显著降低田面水NH₄⁺-N含量,缩短NH₄⁺-N流失风险期,降低氮挥发潜能,这与郑小龙等^[1]、Das等^[20]研究相似,但猪粪施用是否能减少氮挥发量,还应结合气体试验予以验证。

试验表明,施肥后21d内应是控制其氮、磷素损失的关键时期,该时间长于前人^[21-22]在江浙地区的研究结果。这可能是因为成都平原的气温、太阳辐射等均低于江浙地区,肥料养分释放相对较慢。而且猪粪的生物活性能够有效延长氮的释放周期^[23],使田面水在施肥15d后仍保持一定水平的氮含量,导致田面水氮素流失风险延长;同时,猪粪施用处理的TP、DTP、PP含量是仅施同等肥力无机肥处理的2~3倍,有机肥中的磷素不易被固定到土壤中,更容易溶解到水体当中^[24],猪粪施用更是使田面水磷含量在施肥后9~15d出现第二个峰值,明显增加了磷素流失风险。

农田消纳是废弃物资源化利用的重要途径^[25-26]。2013年结果表明,与单施化肥相比,加施全量麦秆(T1)会使作物氮含量降低(表6)。这可能是因为秸秆具有高C/N,还田后微生物会与水稻争夺氮素^[27-28]。结合实地调查情况,设一头猪鲜猪粪年排泄量为1t,试验以水稻季每667m²田承载3头猪0.5年的排泄量为低量处理(T2)、以承载3头猪1年的排泄量为高量处理(T3),结果表明在T3处理的施用范围内,用猪粪替代一部分化肥对水稻产量及糙米磷含量并无显著影响。最适宜的猪粪施用量还有待进一步研究。

4 结论

(1)与纯化肥相比,加施全量麦秆对田面水中的各形态氮、磷含量及分配无显著影响;猪粪施用会显著提高TP、DTP、PP含量,达高量水平后,会显著降低田面水NH₄⁺-N含量、DTN/TN比例。

(2)化肥氮施用量会在较大程度上影响田面水NH₄⁺-N含量,在一定范围内用猪粪替代化肥可降低田面水NH₄⁺-N含量,降低氮挥发潜能,但猪粪的生物活性使田面水氮素流失风险期延长,加上猪粪自身较高的含磷量,使田面水磷含量在施肥5~7d后呈明显上升趋势,磷素流失风险期延长,磷素流失风险增加。

(3)本试验条件下,基于成都平原稻麦轮作、麦秆全量还田模式,综合废弃物施用下稻田田面水氮磷流失风险、水稻产量及糙米品质,水稻季每667m²田的猪粪承载量不宜超过3头猪0.5年的排泄量,并应在施肥后21d内严格控制田面水的损失。

参考文献:

- [1] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-43.

- ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of reducing nitrogen and biomass carbon fertilization on loss of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and grain production[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 39-43.
- [2] 李冰, 王昌全, 谭婷, 等. 成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 308-315.
LI Bing, WANG Chang-quan, TAN Ting, et al. Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in top soils of the Chengdu Plain[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 308-315.
- [3] 王文国, 祝其丽, 张翔, 等. 四川省农村饮水安全现状与环境治理对策[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 109-111.
WANG Wen-guo, ZHU Qi-li, ZHANG Xiang, et al. Status of rural drinking water safety in Sichuan Province and its environmental management measures[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(1): 109-111.
- [4] 孙永明, 李国学, 张夫道, 等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169-173.
SUN Yong-ming, LI Guo-xue, ZHANG Fu-dao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 169-173.
- [5] 李明德, 吴海勇, 聂军, 等. 稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17): 3572-3579.
LI Ming-de, WU Hai-yong, NIE Jun, et al. Utilities of straw and wastes of straw recycling returning on rice planting[J]. *China Agriculture Science*, 2010, 43(17): 3572-3579.
- [6] 刘闯, 于伯华, 刘向群. 我国再生资源企业布局省际差异分析[J]. 地理科学进展, 2007, 25(6): 1-11.
LIU Chuang, YU Bo-hua, LIU Xiang-qun, et al. Spatial analysis on differences of recycling enterprises distribution among China's provinces[J]. *Progress in Geography*, 2007, 25(6): 1-11.
- [7] 刘益仁, 郁洁, 李想, 等. 有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 989-994.
LIU Yi-ren, YU Jie, LI Xiang, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbiological characteristics in wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 989-994.
- [8] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液施用对土壤氨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.
WU Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, et al. Effects of pig manure-bio-gas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 163-168.
- [9] Huang C, Deng L J, Gao X S, et al. Effects of fungal residues return on soil enzymatic activities and fertility dynamics in a paddy soil under a rice-wheat rotation in Chengdu Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 108(1): 16-23.
- [10] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 838-846.
SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 838-846.
- [11] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 茗溪流域不同施肥条件下稻田田面水氮磷动态特征及产量研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 207-213.
WU Jun, FAN Jian-bo, HE Yuan-qiu, et al. Study on rice yield and dynamics of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field under different fertilizations in Tiaoxi River Basin[J]. *Soils*, 2013, 45(2): 207-213.
- [12] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 727-733.
- [13] 王江涛, 赵春霞, 尹晓楠, 等. 细菌对海水中各形态氮的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(3): 468-472.
WANG Jiang-tao, ZHAO Chun-xia, YIN Xiao-nan, et al. Research on the nitrogen forms in the growth of microbe[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(3): 468-472.
- [14] Schils R, Smijders P. The combined effect of fertilizer nitrogen and phosphorus on herbage yield and change in soil nutrients of a grass/clover and grass only sward[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2004, 68: 165-179.
- [15] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [16] Al-Kanani T, MacKenzie A F, Barthakur N N. Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1761-1766.
- [17] Mikkelsen D S, De Datta S K, Obcemea W N. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(5): 725-730.
- [18] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2009(6): 100-103.
HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, SUN Qian-qian, et al. Characteristics of ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different pH values of purple soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009(6): 100-103.
- [19] 曹凑贵, 李成芳, 寇志奎, 等. 不同类型氮肥和耕作方式对稻田土壤氨挥发的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(5): 881-886.
CAO Cou-gui, LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, et al. Effects of N source and tillage on NH₃ volatilization from paddy soils[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(5): 881-886.
- [20] Das P, Kim K H, Sa J H, et al. Emissions of ammonia and nitric oxide from an agricultural site following application of different synthetic fertilizers and manures[J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(2): 177-190.

- [21] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):743-749.
ZHAO Dong, YAN Ting-mei, Qiao Jun, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):743-749.
- [22] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2012, 25(4):21-25.
XIA Xiao-Jiang, HU Qing-yu, ZHU Li-qun, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 25(4):21-25.
- [23] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(2):282-288.
ZHU Cai-hong, DONG Cai-xia, SHEN Qi-rong, et al. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2):282-288.
- [24] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 等. 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响[J]. 土壤, 2009, 41(6):907-911.
SUN Rui-juan, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Variation of N & P contents in paddy soil water and its potential environmental effect under pig manure application[J]. *Soils*, 2009, 41(6):907-911.
- [25] 吴根义, 廖新梯, 贺德春, 等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7):1261-1264.
WU Gen-yi, LIAO Xin-di, HE De-chun, et al. Current situation and countermeasures of livestock industry pollution control in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1261-1264.
- [26] 孟祥海, 张俊飏, 李鹏, 等. 畜牧业环境污染形势与环境治理政策综述[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1):1-8.
MENG Xiang-hai, ZHANG Jun-biao, LI Peng, et al. Summary of livestock environmental pollution and environmental management policies [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1):1-8.
- [27] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4):569-573.
LI Yong, CAO Hong-di, CHU Ya-yun, et al. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil [J]. *Soils*, 2010, 42(4):569-573.
- [28] 刘世平, 陈文林, 聂新涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆分解进程的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2007, 13(6):1049-1053.
LIU Shi-ping, CHEN Wen-lin, NIE Xin-tao, et al. Effect of embedding depth on decomposition course of crop residues in rice-wheat system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6):1049-1053.