

가축분뇨관리 과정 중 손실되는 질소 : A review

최동윤 · 송준익 · 박규현 · Modabber A. Khan · 안희권*

농촌진흥청 국립축산과학원

Nitrogen Losses During Animal Manure Management : A review

Choi, Dong-Yoon, Song, Jun-Ik, Park, Kyu-Hyun, Khan, Modabber A. and
Ahn, Heekwon*

National Institute of Animal Science, R.D.A.

Summary

Nitrogen included in animal manure can be used as organic fertilizer if it is treated properly but it may cause serious air and water pollution without proper management. Significant amount of nitrogen losses happen in the form of ammonia when the manure staying in animal house and storage facilities and being composted and applied to the field. In order to maximize the manure nitrogen utilization, it is important to understand the mechanisms of nitrogen loss during the diverse manure handling and treatment procedures. The plant available nitrogen portion of total nitrogen in excreted manure was evaluated based on animal type, animal manure collection system, manure treatment process, and application method. About 27% of nitrogen included in excreted pig manure could be plant available if it is applied to the field after composting process. The plant available nitrogen portion varies from 29% (surface application) to 54% (solid injection) based on application method of digested piggery slurry. Plant can use 18% of manure nitrogen if the composted cattle and poultry manure applied to the field using surface application method. Manure treatment and application methods need to be carefully selected to control and utilize the manure nitrogen properly.

(Key words : Ammonia, Animal manure, Nitrogen loss, Incorporation)

서 론

단백질은 질소함유 유기물로써 가축 성장 및 축산물 생산을 위해 필요한 영양소로 가축 사료의 영양적 가치를 결정하는 매우 중요한 성분이다. 축종이나 성장단계에 따라

다소 차이가 있기는 하지만 가축이 섭취한 질소의 약 60~90%는 체내에서 이용되지 못하고 분뇨의 형태로 배설되는 것으로 보고된 바 있다 (Rotz, 2010). 가축분뇨와 함께 배출된 질소성분은 작물 성장에 필요한 비료성분으로 활용가치가 매우 높음에도 불구하고 상

* 충남대학교 동물바이오시스템과학과(Dept. of Animal Biosystem Science, Chungnam National University)
Corresponding author : Heekwon Ahn, Dept. of Animal Biosystem Science, Chungnam National University,
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea, E-mail: hkahn@cnu.ac.kr, TEL:
042-821-5785

2012년 11월 16일 투고, 2012년 11월 27일 심사완료, 2012년 12월 5일 게재확정

당량의 질소는 저장, 처리, 토양환원, 작물 이용 등의 과정을 거치면서 NH₃, NO₃, NO₂, N₂O, N₂ 등의 형태로 전환되어 대기나 수계로 손실되고 있다 (Fig. 1).

대기로 휘산되거나 수계로 유입된 질소화합물은 식수오염 및 부영양화, 지구온난화 등 다양한 환경문제를 야기하고 있다 (NRC, 2003). NO₃-N의 농도가 10 mg/L 이상으로 질산염에 의해 오염된 지하수는 어린아이들에게 청색증을 유발할 수 있으며 강우 시 수계로 유입된 질산염은 강이나 호소의 부영양화를 유발할 수도 있다 (Di and Cameron, 2002; Lucassen et al., 2005). 질산화와 탈질과정에서 생산되는 N₂O의 경우 CO₂, CH₄ 등과 함께 지구 온난화에 기여할 뿐만 아니라 성층권내 오존 파괴에도 관여한다 (Paul et al, 1993; Betlach and Tiedje, 1981).

가축분뇨에서 기인하는 질소화합물에 의한 환경오염을 줄여주고 작물에 필요한 비료원으로써 가축분뇨를 효율적으로 활용하기 위해서는 질소 손실을 최소화할 수 있는 가축분뇨 관리방안을 마련할 필요가 있다. 가축분뇨에 함유된 질소를 적절하게 활용하기 위해서는 배설된 분뇨의 저장, 처리, 토양시비 등의 과정에서 질소손실 기작 및 손실 가능한 질소량에 대해 올바르게 이해하는 것이 무엇보다 중요하다.

가축분뇨 취급, 처리 등의 관리과정에서 손실되는 질소를 평가·연구한 기존의 연구

자료들을 바탕으로 각 축종별 (돼지, 육우, 유우, 닭) 분뇨 저장·처리·토양시비 방법에 따른 질소 손실률을 산정하고 우리나라 축산농가에서 질소 손실을 저감시킬 수 있는 방안을 제시하기 위한 목적으로 본 논문은 작성되었다.

가축분뇨 처리 단계별 질소 손실률

1. 가축의 질소 이용률

사료로 섭취한 질소 이용률은 유우, 육우, 돼지 및 닭이 각각 16~24%, 10% 이하, 30~40% 정도에 불과할 정도로 매우 낮다 (Kohn et al., 1997; Hutchings et al, 1996; Mohan et al, 1996; Han et al., 2001). 가축의 질소 이용률은 영양학적인 방법을 이용해 일부 개선시킬 수는 있으나 이론적으로 최대 50% 이상으로 개선하는 것은 불가능하다고 보고된 바 있다 (Rots, 2004). 가축이 섭취한 질소 성분은 가축에 의해 전량 이용되지 못하고 섭취량의 60~90%는 분뇨의 형태로 배설된다고 볼 수 있다. 이와 같이 가축에 의해 이용되지 못하고 배설되는 질소가 많다는 것은 가축분뇨가 유기질 질소 비료로써 잠재력이 높다는 것을 의미함과 동시에 적절하게 관리되지 못할 경우 환경오염원으로써 작용할 우려가 높다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

2. 분뇨의 축사 체류 중 손실되는 질소

가축이 배설한 분뇨가 수거되기 전 축사에 체류하는 과정에서 휘산되는 질소는 Table 1에 나타난 바와 같다. Slat을 이용한 슬러리 돈사의 경우 축사내에서 분뇨가 체류하는 과정에서 분뇨 중 총질소의 25%가 손실된다. 깔짚우사와 Free stall 우사의 경우 각각 35%와 16%의 총질소가 우사내에서 손실된다. 계사의 경우 Aviary와 고상식 시스템은 각각

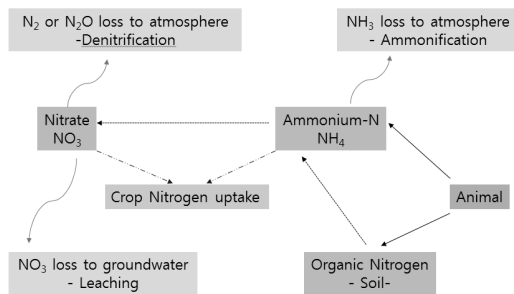


Fig. 1. Animal manure nitrogen flows in the environment.

Table 1. Nitrogen losses from animal housing facilities*

Items		% of total Nitrogen
Cattle	Bedded pack	35
	Free stall	16
Swine	Slatted floor	25
Poultry	High rise	50
	Aviary	30

* Rotz, 2004.

30%와 50% 정도의 질소 성분이 계사내에서 분뇨 수거 전에 손실된다.

3. 분뇨 저류 및 저장 과정 중 손실되는 질소

축사로부터 수거된 분뇨를 저장 또는 저류하는 과정에서 손실되는 질소는 Table 2에 나타난 바와 같다. 고품 우분 및 돈분의 경우 저장과정 중 약 15~20%의 총질소 성분이 손실된다. 계분의 경우 적게는 20~40%에서 많게는 약 50% 정도의 총질소 성분이 저장과정에서 손실된다고 본다. 슬러리형태의 액

상분뇨 저류과정에서는 약 25%의 총질소가 손실된다고 한다. 분뇨 저류 및 저장 과정 중 질소 성분은 NH₃, NO₃, N₂O 등의 형태로 손실되는데, 이중 NH₃에 의한 손실이 대부분을 차지한다고 볼 수 있다.

4. 분뇨 처리과정 중 손실되는 질소

가축분뇨를 퇴비화하거나 혐기소화시킬 때 질소 손실률은 Table 3과 같다. Parkinson 등 (2004)의 보고에 의하면, 우분뇨의 경우 4개월 동안의 퇴비화 과정 중 퇴비더미 교반을 하지 않을 경우 총질소 중 약 25%의 질소가 손실되며 퇴비더미를 2회 교반해 줄 경우 약 35%가 손실된다. Tiquia 등 (2002)의 연구에 의하면 돈분의 경우 퇴비화 과정 중 총질소 성분의 약 37~60%가 손실된다고 한다. 퇴비화 과정 중 계분의 질소 손실률은 연구자에 따라서 44, 50, 59%로 보고된 바 있다 (Kirchmann & Witter, 1989; Mahimairaja et al., 1994; Tiquia & Tam, 2000). 혐기소화의 경우 질소 손실은 퇴비화에 비해 매우 미약하다고 볼 수 있다. Kirchmann & Witter (1989)는 혐

Table 2. Nitrogen losses during manure storage

Items		% of total Nitrogen	References
Solid	Cattle	15~20	Peterson & Sorensen, 2008, Rotz, 2004
	Swine	15~20	Peterson & Sorensen, 2008, Rotz, 2004
	Poultry	20~40, 50	Rotz, 2004, Kirchmann & Witter, 1989
Liquid	Slurry	10	Rotz, 2004

Table 3. Nitrogen losses during animal manure treatment

Items		% of total Nitrogen	References
Composting	Cattle	25 (without mixing for 4 months) 35 (twice for 4 months)	Parkinson et al., 2004
	Swine	37~60	Tiquia et al, 2002
	Poultry	44, 50, 59	Kirchmann & Witter, 1989 Mahimairaja et al., 1994 Tiquia & Tam, 2000
Anaerobic digestion	Slurry	1, 10	Kirchmann & Witter, 1989 Lorimor, 2000

Table 4. Ammonium nitrogen content of animal manure*

Items		% of total Nitrogen
Solid	Cattle	27
	Swine	42
	Poultry	19
Slurry	Cattle	41
	Swine	39
	Poultry	49

* Sommer & Hutchings (2001).

기소화 과정 중 총질소의 약 1%가 손실된다고 보고하였으며, Lorimor (2000)의 연구자료에 의하면 약 10%의 질소 성분이 손실된다고 한다.

5. 토양 시비과정 중 손실되는 질소

가축분뇨에 함유된 질소 성분 중 암모니아태 질소(NH₄-N)는 pH가 알칼리로 치우치거나 온도가 높을수록 휘산이 잘 되는 특성을 갖고 있다. Sommer & Hutchings (2001)에 의해 구명된 가축분뇨의 암모니아태 질소 함량은 Table 4에 나타난 바와 같다.

돈분뇨의 경우 고형물과 슬러리 형태에 따

라 암모니아태 질소의 함량이 39~42%로 큰 차이가 없으나 우분뇨와 계분의 경우 슬러리 형태가 고형물에 비해 암모니아태 질소 함량이 높다. 그러므로 액상의 우분뇨와 계분은 고형물에 비해 토양 시비 시 질소 손실 가능성이 높다고 볼 수 있다.

Table 5는 계절, 온습도, 시비방법 등에 따라 가축분뇨 토양 시비 시 암모니아태 질소의 손실률을 나타내고 있다.

덥고 건조한 날씨에 가축분뇨를 토양에 시비한 후 1일 경과한 시점에 경운을 할 경우 가축분뇨 중의 암모니아태 질소의 50%는 휘산된다. 토양 살포 후 경운을 늦게하면 할수록 암모니아태 질소 손실률은 증가한다. 토양 살포 후 5일이 경과한 시점에 경운을 할 경우 전체 암모니아태 질소의 80%가 휘산된다. 덥고 건조한 날씨에 가축분뇨를 토양 살포한 후 경운을 하지 않을 경우 가축분뇨 중의 암모니아태 질소 전량은 휘산된다고 봐도 무방하다. 암모니아태 질소는 식물이 이용할 수 있는 형태로 휘산되지 않고 토양내에 보존될 경우 작물 성장에 매우 유익한 질소 성분이므로 토양 시비 시 휘산을 최소화 할 수 있도록 주의할 필요가 있다.

Table 5. Loss of the ammonium nitrogen fraction*

Day after applicaton	Mean	<10°C		>25°C	
		Wet	Dry	Wet	Dry
Spring					
Incorporated within 1 day	25	10	15	25	50
Incorporated within 3 days	35	15	22	38	65
Incorporated within 5 days	45	20	30	50	80
Not incorporated	66	40	50	75	100
Injected	0	0	0	0	0
Fall					
Early fall	66	40	50	75	100
Late fall	25	25	25	N/A	N/A

* Atia, 2008.

Table 5를 바탕으로 토양 시비 시 암모니아 휘산을 줄여주는 방법은 다음과 같다.

첫째, 기온이 높은 봄이나 여름은 피하는 것이 좋고 비온 직후 및 야간에 살포하는 것이 바람직하다. 둘째, 바람이 많이 불지 않을 때 살포하는 것이 좋으며 가능한 시비 후 바로 경운을 하는 게 바람직하다. 셋째, 가축분뇨를 토양내에 바로 주입(Injection) 할 경우 암모니아태 질소 손실을 최소화(0%)할 수 있다.

국내 축산농가 분뇨처리 형태를 고려한 작물 이용 가능 질소 산정

1. 돈분뇨 퇴비화 및 혐기소화처리 시 작물이 이용 가능한 질소

위에서 언급한 문헌자료를 바탕으로 돈슬러리를 퇴비화 과정을 거친 후 작물에 시비했을 때 실제 이용 가능한 질소의 양을 계산한 결과는 Table 6과 같다.

돼지가 섭취한 사료에 함유된 질소의 65%는 체내에서 흡수되지만 나머지 35%는 분뇨의 형태로 배설된다. 배설된 분뇨(슬러리 타입)에 함유되어 있는 질소 성분은 저류, 퇴비화, 토양 시비 등의 과정을 거치면서 손실되고 최종적으로 작물에게 시비된 후 2년이 경과한 시점에서 작물이 실제 이용 가능한 양

은 배설된 분뇨에 함유된 질소의 27%(섭취한 사료에 함유된 질소 기준 17%)에 불과한 것으로 나타났다.

혐기소화과정을 거친 돈슬러리를 표면살포와 토양주입 방법 등을 이용해 작물에 시비한 후 2년 이 경과한 시점에서 작물이 이용 가능한 질소의 양을 평가한 결과는 Table 7과 같다.

돈슬러리를 퇴비화할 경우 암모니아성 질소 휘산에 의한 질소 손실은 약 50% 정도로 매우 높지만, 혐기소화할 경우 질소 손실은 1% 수준에 불과하다. 가축분뇨 혐기소화는 퇴비화에 비해 가축분뇨에 함유된 질소 손실을 최소화할 수 있다는 측면에서 축산을 기반으로 한 지속 가능한 농업을 구축함에 있어 분뇨의 비료성분 활용을 극대화하는데 매우 유리한 처리시스템이라고 할 수 있다.

돈슬러리 혐기소화폐액에 함유된 질소의 약 70%는 혐기소화과정을 거치면서 암모니아성 질소의 형태로 존재하는데 토양 표면에 살포할 경우 총질소의 약 66%는 손실되지만 토양주입을 할 경우 암모니아성 질소 휘산에 의한 질소 손실을 차단할 수 있다. 혐기소화된 돈분뇨를 토양주입할 경우 2년 동안 작물이 이용 가능한 질소는 배설된 분뇨에 함유된 질소의 약 54% 수준인 반면, 토양표면에 살포할 경우 배설된 분뇨에 함유된 질소의 약 29%만 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 6. Plant available nitrogen 2 years after surface application of composted pig slurry

		Loss/utilize (%)	N (kg)
Feed	Intake N	—	100
Absorbed	Absorbed N	35	65
Loss in slurry pit	Under the slatted floor	25	49
Loss during storage	Slurry	10	44
Loss during treatment	Composting	50	22
Loss during application	Surface application	66 ¹⁾	21.5 ²⁾
Plant available N	2years after application	80	17(27) ³⁾

¹⁾ % of total ammonium nitrogen.

²⁾ Ammonium N content of pig slurry and sawdust mixture compost is 3% of TN (22-22×0.03×0.66)

³⁾ Based on excreted manure N.

Table 7. Plant available nitrogen 2 years after application of anaerobically digested pig slurry

	Surface application		Soil injection	
	Loss/utilize (%)	N (kg)	Loss/utilize (%)	N (kg)
Feed (Intake N)	—	100	—	100
Absorbed N	35	65	35	65
Loss in slurry pit	25	49	25	49
Loss during storage	10	44	10	44
Loss during anaerobic digestion	1	43.5	1	43.5
Loss during application	66 ¹⁾	23.5 ²⁾	0	43.5
Plant available N (2 years after application)	80	19(29) ³⁾	80	35(54) ³⁾

¹⁾ % of total ammonium nitrogen.

²⁾ Ammonium N content of pig slurry digested is 70% of TN ($43.5-43.5 \times 0.7 \times 0.66$)

³⁾ Based on excreted manure N.

2. 우분뇨 퇴비화 시 작물이 이용 가능한 질소

국내 한우 및 유우 농가의 90% 이상은 톱밥우사를 활용한 분뇨수거 방법을 적용하고 있으며, 톱밥우사에서 수거된 분뇨의 대부분은 퇴비화 과정을 거친 후 토양으로 환원되고 있다. 톱밥우사에서 수거된 우분뇨를 퇴비화한 후 작물에 시비했을 때 3년 동안 작물이 이용 가능한 질소를 계산한 결과는 Table 8과 같다.

한우와 유우분뇨 모두 퇴비화 과정을 거친 후 토양에 환원했을 경우 3년 동안 작물이 이용 가능한 질소 성분은 배설된 분뇨에 함유된 총질소의 18%에 불과한 수준으로 나타났다.

3. 계분 퇴비화 시 작물이 이용 가능한 질소

Aviary식 양계시설을 적용하고 있는 계사에서 수거한 계분을 퇴비화한 후 토양 표면에 시비할 경우 2년 동안 작물이 이용 가능

Table 8. Plant available nitrogen 3 years after surface application of composted cattle manure

	Korean beef manure		Dairy manure	
	Loss/utilize (%)	N (kg)	Loss/utilize (%)	N (kg)
Feed (Intake N)	—	100	—	100
Absorbed N	10	90	25	75
Loss from bedded pack	35	59	35	49
Loss during storage	18	48	18	40
Loss during composting	30	34	30	28
Loss during application	66 ¹⁾	33 ²⁾	66 ¹⁾	27.5 ³⁾
Plant available N (3 years after application)	50	17(18) ⁴⁾	50	14(18) ⁴⁾

¹⁾ % of total ammonium nitrogen.

²⁾ Ammonium N content of Korean beef manure and sawdust mixture compost is 3% of TN ($34-34 \times 0.03 \times 0.66$)

³⁾ Ammonium N content of Dairy manure and sawdust mixture compost is 3% of TN ($34-34 \times 0.03 \times 0.66$)

⁴⁾ Based on excreted manure N.

Table 9. Plant available nitrogen 2 years after surface application of composted poultry manure

		Loss/utilize (%)	N (kg)
Feed	Intake N	—	100
Absorbed	Absorbed N	35	65
Loss in poultry house	Aviary	30	46
Loss during storage	Manure (Solid)	35	30
Loss during treatment	Composting	50	15
Loss during application	Surface application	66 ¹⁾	14.5 ²⁾
Plant available N	2 years after application	80	12(18) ³⁾

¹⁾ % of total ammonium nitrogen.

²⁾ Ammonium N content of poultry manure and sawdust mixture compost is 3% of TN(15-15×0.03×0.66)

³⁾ Based on excreted manure N.

한 질소 성분을 계산할 결과는 Table 9와 같다.

계분 퇴비를 경운하지 않은 상태에서 표면 살포했을 경우 작물은 2년 동안 배설된 분뇨에 함유된 총질소 성분의 18% 수준만 실제 이용 가능한 것으로 나타났다.

적 요

가축분뇨 중의 질소성분이 불필요하게 대기중으로 휘산되어 환경오염을 일으키거나 가축분뇨의 비료 가치를 저하시키는 것을 줄여주기 위해서는 가축분뇨 처리단계 별 질소 손실 기작 및 조건을 올바르게 이해할 필요가 있다. 각 축종별 우리나라의 전형적인 축사시설 및 가축분뇨 처리형태를 기준으로 가축분뇨에 함유된 질소가 토양에 살포되어 작물에 의해 이용될 수 있는 비율을 산정한 결과는 다음과 같다.

1. 슬러리 형태로 수거한 돈분뇨를 퇴비화한 후 토양에 표면살포했을 경우 시비 후 2년 이 경과한 시점에서 작물이 이용 가능한 질소 성분은 배설된 분뇨에 함유된 총질소 성분의 27% 수준이다.

2. 슬러리 형태로 수거한 돈분뇨를 혐기소화 한 후 토양 표면에 살포한 상태에서 2년 후에 작물이 이용 가능한 질소는 분뇨중 총

질소의 29%이며, 혐기소화 한 소화폐액을 토양주입 (Injection)에 의해 살포할 경우 분뇨중 총질소의 54%가 2년 후 작물에 의해 이용 가능하다. 이러한 결과는 토양주입이 가축분뇨 토양살포 시 휘산되는 암모니아를 저감시키는데 매우 효율이 높음을 입증하는 좋은 예라고 볼 수 있다.

3. 깔짚우사에서 수거한 한우 및 젖소 분뇨를 퇴비화한 후 토양 살포를 할 경우 3년 이 경과한 시점에 작물이 이용 가능한 질소는 분뇨 중 총질소의 18% 수준이다.

4. 계분을 퇴비화한 후 토양 살포를 할 경우 2년이 경과한 시점에 작물이 이용 가능한 질소는 분뇨 중 총질소의 18% 수준으로 계산되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 어젠다 연구개발 사업 연구비로 수행하였으며 연구에 도움을 주신 참여 연구원들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Atia, A. 2008: Ammonia volatilization from manure application. AGRI-FACTS Agdex538-3. Agricultural Stewardship Division, Alberta Agriculture and Food.

2. Betlach, M. R. and Tiedje, J. M. 1981. Kinetic explanation for accumulation of Nitrite, Nitric Oxide, and Nitrous Oxide during bacterial denitrification. *Applied and Environmental Microbiology*, 42(6):1074-1084.
3. Di, H. J. and Cameron K. C. 2002. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 237-256.
4. Han I. K., J. H. Lee, X. S. Piao, and L. Defa. 2001: Feeding and management system to reduce environmental pollution in swine production. *Asian-Aust. Journal of Animal Science*, 14, 432-444.
5. Hutchings, N. J., Sommer, S. G. and Jarvis, S. C. 1996. A model of ammonia volatilization from a grazing livestock farm. *Atmospheric Environment*, 30, 589-599.
6. Kirchmann, H., Witter, E. 1989: Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil*, 115, 35-41.
7. Kohn, R. A., Dou, Z., Ferguson, J. D. and Boston, R. C. 1997. A sensitivity analysis of nitrogen losses from dairy farms. *Journal of Environmental Management*, 50, 417-428.
8. Lucassen E. C., H. E. T, Smolders, A. J. P., Lamers, L. P. M, Roelofs, J. C. M. 2005. Water table fluctuations and groundwater supply are important in preventing phosphate - eutrophication in sulphate-rich fens: Consequences for wetland restoration. *Plant and Soil*, 269, 109-115.
9. Lorimor J. 2000: Swine USA anaerobic digester. <http://www.rcmdigesters.com/publications/swusa.html>.
10. Mahimairaja, S., Bolan, N. S., Hedley, M. J. and Macgregor, A. N. 1994: Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresource Technology*, 47, 265-273.
11. Mohan, B., R. Kadirvel, A. Natarajan, and M. Bhaskaran. 1996. Effect of probiotic supplementation on growth, nitrogen utilization and serum cholesterol in broilers. *Br. Poultry Science*, 37, 395-401.
12. NRC. 2003. *Air Emissions from Animal Feeding Operations: Current Knowledge, Future Needs*. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
13. Parkinson, R., Gibbs, P., Burchett, S. and Misselbrook, T. 2004. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. *Bioresource Technology*, 91, 171-178.
14. Paul J. W., Beauchamp E. C. and Zhang X. 1993. Nitrous and nitric oxide emissions during nitrification and denitrification from manure-amended soil in the laboratory. *Canadian Journal of Soil Science*, 73, 539-553.
15. Peterson, J. and Sorensen, P. 2008. Loss of nitrogen and carbon during storage of the fibrous fraction of separated pig slurry and influence on nitrogen availability. *Journal of Agricultural Science*, 146, 403-413.
16. Rotz, C. A. 2010. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science*, 82, E119-E137.
17. Sommer, S. C. and Hutchings, N. J. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction-invited paper. *European Journal of Agronomy*, 15, 1-15.
18. Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. 2000. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, 110, 535-541.
19. Tiquia, S. M., Richard, T. L. and Honeyman, M. S. 2002. Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 62, 15-24.