



Research Paper

Characteristics of Ammonia Emissions from the use of Compost manure and Composite Fertilizer in Upland Field

Yeon-Jin Lee¹ · Eun-Chae Im¹ · Sung-Chang Hong² · Seong-Jik Park^{1,3*}

¹Department of Bioresources and Rural system Engineering, Hankyong National University, Republic of Korea

²Climate change assessment division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Agency, Korea

³Institute of Agricultural Environmental Science, Hankyong National University, Republic of Korea

(Received July 22, 2023; Revised August 14, 2023; Accepted August 21, 2023)

Objectives : This study aimed to monitor ammonia volatilization in upland fields under different nitrogen fertilizer applications, comparing compost manure (CM) and composite fertilizer (CF) and investigate the environmental factors influencing ammonia volatilization.

Methods : Ammonia was collected using the static chamber method in upland fields, and the soil analyses were conducted before and after ammonia volatilization monitoring. Pearson's correlation analysis and machine learning were utilized to determine the relationship between ammonia volatilization and environmental factors. Growth characteristics of harvested crops were analyzed, and Duncan analysis confirmed significant differences between nitrogen fertilizer treatments.

Results and Discussion : In both CM and CF fertilized fields, there was no significant difference in ammonia volatilization. However, more ammonia volatilization was observed in the potato field compared to the Chinese cabbage field, attributed to higher $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the soil of the potato field. Machine learning identified soil temperature and moisture as significant factors affecting ammonia volatilization. The analysis of crop growth revealed a positive effect of increased nitrogen fertilizer application. The result showed that single CM application was insufficient to meet crop nutrient demands.

Conclusion : This study quantified ammonia emissions, identified influencing factors, and provided valuable data for enhancing fertilizer use efficiency and nitrogen management strategies in agriculture.

Keywords : Ammonia emission, Compost manure, Composite fertilizer, Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration, Machine learning

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: parkseongjik@hknu.ac.kr

Tel: 031-678-5131 Fax: 031-678-5139

© 2023, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

밭 토양에서 퇴비와 복합비료 사용에 따른 암모니아 배출 특성

이연진¹ · 임은채¹ · 홍성창² · 박성직^{1,3*}

¹한경대학교 사회안전시스템공학부 지역자원시스템공학전공

²농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

³한경대학교 농촌환경과학연구소

목적: 퇴비(CM)와 복합비료(CF)를 사용한 밭에서 질소비료 시비량에 따른 암모니아 휘발을 모니터링하고, 암모니아 휘발에 영향을 미치는 환경요인을 규명하였다.

방법: 정채식채배방법을 이용하여 밭에서 휘발된 암모니아를 포집 및 분석하고, 실험 전후 토양을 채취하여 분석하였다. Pearson's 상관분석 및 머신러닝을 통해 암모니아 휘발과 환경요인 사이의 관계 및 중요도를 분석하였다. 수확된 작물은 생육특성을 분석하고 Duncan 분석을 통해 질소 비료 처리간 유의한 차이를 확인하였다.

결과 및 토의: CM과 CF를 시비한 밭 토양에서 CM과 CF간의 암모니아 휘발의 차이는 보이지 않았지만, 감자밭에서 배추밭보다 더 많은 암모니아 휘발이 발생했다. 이는 밭 토양의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 함량이 배추밭보다 감자밭에서 많기 때문이다. 머신러닝 결과 토양 온도 및 토양 수분이 암모니아 휘발에 영향을 미치는 주요 환경요인으로 확인되었다. 수확한 감자와 배추의 생육 특성 분석결과 질소 비료의 시비량 증가는 작물 생육에 긍정적인 영향을 미쳤다. CM의 단일 적용은 작물 생육에 필요한 영양분을 공급하기에 부족했다.

결론: 본 연구에서 얻은 암모니아 배출량에 대한 정량적 데이터를 통해 농업에서 암모니아 배출량의 기여도 및 암모니아 휘발의 영향요인을 확인할 수 있으며, 비료 사용 효율 개선 및 질소 관리 전략의 기초 자료를 제공하였다.

주제어: 암모니아 배출, 퇴비, 복합비료, 토양 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도, 머신러닝

1. 서론

질소는 식물 생육에 필요한 필수 영양소로 생산성을 높이고 전 세계 식량 수요를 충족시키는데 필수적인 요소다.^{1,2)} 질소 비료 시비로 작물의 생산성을 높일 수 있지만, 침출, 탈질, 암모니아 휘발 등 다양한 과정을 통해 토양에서 질소 손실이 발생할 수 있으며, 이는 질소 손실과 관련된 토양 산성화, 대기 중 미립자 물질 생성, 수생태계 부영양화, 온실가스 증가 등의 심각한 환경 문제를 야기한다.^{3,4,5)}

암모니아 휘발은 질소 비료를 토양에 사용할 때 질소가 암모니아 가스 형태로 토양에서 손실되는 과정이며, 암모니아 휘발은 논에서 총질소 사용의 9~39%를 차지하는 주요 질소 손실의 주요 과정이다.^{6,7)} 토양에서 대기로의 암모니아 휘발은 인간의 건강을 해칠 수 있는 미세먼지(PM_{2.5})의 전구체이며⁸⁾, 공기 중의 다른 오염물질과 반응하여 질소 산화물 및 오존 같은 2차 오염물질을 형성하여 기후변화에 영향을 줄 수 있는 온실가스이기도 하다.^{9,10)} 또한, 암모니아가 초목에 축적되면 잎과 다른 식물 조직에 손상을 주어 작물 수확량을 줄이

고 식물 생육에 부정적인 영향이 미칠 수 있다.¹¹⁾ 국내 농경지에서 배출되는 암모니아는 전체 암모니아 배출량의 약 80%를 차지하며, 농업에 질소 비료를 사용하는 것은 전 세계 암모니아 배출량의 가장 큰 원인 중 하나이다.^{12,13)}

암모니아 배출은 비료 시비량, 기후 환경, 토양 특성과 같은 다양한 요인의 영향을 받는다.¹⁴⁾ 온도의 증가 및 암모니아의 농도가 증가함에 따라 암모니아의 휘발이 증가한다는 이전 연구 보고가 되었다.^{15,16)} Pelster¹⁷⁾는 초기 토양 수분함량에 따라 암모니아 휘발이 증가함을 확인하였다. 암모니아 배출량 및 배출계수에 관한 연구가 많은 연구자에 의해 수행되어왔지만^{18,19,20)}, 작물 종류와 비료 종류에 따라 암모니아 배출계수는 따로 산정되어야 하며, 토양 및 기후가 다른 국가별 암모니아 배출량을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 정교하고 환경에 적합한 암모니아 배출량 평가가 필요하다. 밭 토양에서 암모니아 휘발에 영향을 미치는 요인과 정도를 이해하는 것은 비료사용 효율성을 개선하고 환경 영향을 줄이기 위한 적절한 질소 관리 전략을 개발하는 데에도 중요하다.

국내 암모니아 배출계수에 관한 이전 연구에서 시설 있들개



Fig. 1. Upland fields for potato and Chinese cabbage cultivation.

재배 시 퇴비 사용량에 따른 암모니아 배출계수 산정²¹⁾, 복합 비료 시비에 따른 사과와 배 과수원의 암모니아 배출계수 산정²²⁾ 등의 조사가 이루어졌지만, 퇴비와 복합비료 사용에 대한 서로 다른 두 가지 비료의 암모니아 배출 비교는 연구가 수행된 바 없다. 또한, 밭 토양에서 서로 다른 두 가지 작물(감자, 배추)의 생육 기간의 암모니아 배출량 비교 연구는 다른 연구자에 의해 연구된 적이 없다. 본 연구는 농업에서 일반적으로 사용되는 두 가지 질소 비료인 퇴비와 복합비료로 시비된 밭 토양에서 암모니아 휘발량을 모니터링 및 배출량을 평가하였다. 암모니아 휘발 공정에 대한 토양 특성 및 기상조건의 영향은 작물 재배 중 암모니아 배출 모니터링, 통계분석 및 머신러닝을 통해 분석되었다. 감자와 배추의 생육특성에 대한 질소 비료의 종류와 시비량의 영향도 정량화하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 설계 및 배경

실험을 진행한 밭은 대한민국 안성시 미양면 37° 0'43.27", 127° 15'51.43"에 위치하였고, 2022년 8월 25일부터 11월 23일까지 감자와 배추를 재배하였다. 밭의 각 처리 구는 1.4×2 m² 면적으로 분획하였다(Fig. 1). 감자 종자(추백, *Solanum tuberosum* L.) 및 배추 종자(불암, *Brassica rapa* subsp. *pekinensis* (Lour.) Hanelt)는 파종기를 사용하여 심고, 플라스틱 필름을 사용하여 멀칭했다.

작물 재배를 위한 질소(N) 비료로 서로 다른 퇴비(Compost manure; CM; 질소: 1.8%, 인산: 1.9%, 칼리: 1.6%, 부산물비료(주)승진 비료, 대한민국)와 복합비료(Composite fertilizer; CF; 질소: 17%, 인산: 8%, 칼리: 10%, 유허: 7%, 석회: 4%, 고토: 1%, 탑 원예 비료, (주)풍농, 대한민국)를 사용하였다. 퇴비와 복합비료는 농촌진흥청 비료 사용 지침²³⁾에 따라 감자는 137 kg/ha, 배추는 320 kg/ha을 시비하였다. N 비료 시비량에 따른 암모니아 휘발의 변화를 조사하기 위해 감자(0, 68.5, 137, 205.5 kg/ha)와 배추(0, 160, 320, 480 kg/ha) 재배에 네 가지 수준의 N 비료가 시비 되었다. 퇴비와 복합비료를 표준

시비 N양에 일정한 비율로 첨가한 실험군을 CM_0.5N, CM_1.0N, CM_1.5N, CF_0.5N, CF_1.0N, CF_1.5N으로 약칭하였다. 대조군은 비료를 전혀 처리하지 않은 시험 구로 설정하였다. 비료는 밑거름으로 전량 시비하며, 비료 살포 직후 토양에 뿌려진 비료는 5~10 cm 깊이로 토양과 혼합되었다. 감자와 양배추는 모두 2022년 11월 23일에 수확되었다.

2.2. NH₃ 채취 및 측정

작물의 생육 기간 밭에서 배출되는 암모니아를 포집하기 위해 정체식 챔버 방법(static chamber method)을 사용하여 측정하였다.²⁴⁾ 정체식 챔버 방법은 암모니아 배출량을 측정하는 방법 중 구조가 간단하고 조작이 쉽고 암모니아 회수율이 높아 현장 실험에 적합하다.^{25,26)} 원통형 챔버는 각 처리구 중앙에 토양 표면에서 5 cm 깊이로 설치하였다. 원통형 챔버(높이 30 cm, 직경 12 cm)에 2개의 폴리우레탄 스펀지(두께 2 cm, 지름 12.5 cm)를 삽입하였으며, 상부 및 하부 스펀지는 토양 표면으로부터 각각 23 cm, 15 cm 높이에 위치하였다. 하부 스펀지는 토양과 비료에서 휘발된 암모니아를 실제로 포집하기 위해 사용되었으며, 상부 스펀지는 외부로부터 유입되는 암모니아 간섭을 차단하기 위해 사용되었다. 암모니아 포집을 위해 스펀지는 1 M 인산(H₃PO₄) 용액과 4% 글리세롤(C₃H₈O₃) 용액의 1:1 혼합물 30 mL를 함침시켜 사용하였다. 암모니아 채취는 시비 후 1주일 동안 24시간마다 실시한 후 암모니아 휘발량에 따라 채취 기간을 조정하였다. 하부 스펀지에 모인 암모니아를 2 M 염화칼륨(KCl) 용액 80 mL로 추출하였다. 실험에 사용된 인산(H₃PO₄)은 (주)대정(대한민국 시흥)에서 구입하였고, 글리세롤과 염화칼륨은 삼전화학(대한민국 평택)에서 구입하였다. 추출된 암모니아 용액의 농도는 자동수질분석기(EasyChemJunior, SYSTEA, 이탈리아)를 이용하여 인도 페놀법(ES 04355.1b)²⁷⁾에 따라 분석하였다.

1일 동안 단위면적당 암모니아 배출량은 식 (1)을 통해 환산하였다.²⁸⁾

$$V = \frac{M}{A \times D} \quad (1)$$

V = 암모니아 배출량(kg-N/ha·day)
M = 정체식 챔버 방법으로 포집된 암모니아(kg-N)
A = 챔버 내 토양 면적(ha)
D = 암모니아 채취 기간(day)

작물 재배 중 총 암모니아 배출량은 식 (2)를 사용하여 계산하였다.¹³⁾

$$F = \sum_i^n (V_i \times D_i) \quad (2)$$

F = 총 암모니아 배출량(kg-N/ha)
V_i = i번째 암모니아 채취 간격에서의 배출량(kg-N/ha·day)
D_i = i번째 암모니아 채취 간격의 일수(day)
n = 암모니아 채취 횟수

암모니아 총 배출률은 Gu²⁹⁾ 등의 식을 일부 수정한 식 (3)을 사용하여 계산하였다.

$$ER = \frac{F}{T_N} \times 100 \quad (3)$$

ER = 시비 된 총 암모니아 배출률 N (%)
F = 총 암모니아 플럭스(kg-N/ha)
T_N = 시비 된 총 질소 비료량(kg-N/ha)

퇴비와 복합비료 사용에 따른 두 가지 비료 각각의 암모니아 배출계수는 식 (4)을 이용하여 산정하였다.³⁰⁾

$$EF = \frac{F_N - F_C}{T_N} \times 100 \quad (4)$$

EF : 암모니아 배출계수(%)
F_N : 두 가지 질소 비료(CM and CF) 각각의 총 암모니아 플럭스(kg-N/ha)
F_C : 대조군(비료 없음)의 총 암모니아 플럭스(kg-N/ha)
T_N : 서로 다른 두 가지 질소 비료에서 총 시비 된 질소량 (kg-N/ha)

2.3. 토양 및 작물 분석

각 처리 구의 토양은 실험 전, 후로 토양 오거를 사용하여 0~5 cm 깊이로 채취하였다. 채취한 토양 시료는 풍건 후 화학적 분석을 위해 2 mm 크기의 체를 사용하여 2 mm 이하의 토양을 획득하였다. 토양의 화학적 특성은 모두 농촌진흥청의 토양화학분석법³¹⁾에 따라 분석하였다. 토양의 pH 및 EC는 토양과 증류수를 1:5 비율로 30 분 동안 교반 한 후 pH, EC meter(Seven-multi S40, Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. 유기물 함량 분석은 Tyurin법을, 유효 인산은

Lancaster법을 사용하여 분석하였다. CEC는 ammonium acetate 법으로 교환성 양이온(Ca, Mg, K)을 추출하여, ICP-OES (ICP-OES 5100, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다. 토양의 암모니아태 질소(NH₄-N) 및 질산태 질소(NO₃-N)는 2 M KCl 용액으로 진탕하여 추출하였다. 토양 NH₄-N 및 NO₃-N는 각각 indophenol-blue법과 brucine법을 이용하여 자외선/가시광선 분광광도계(UV/VIS; Optizen POP QX, Mecasys, Korea)를 이용하여 분석하였다.

감자와 배추의 생육특성은 한국표준재배지침^{32,33)}에 따라 조사하였다. 감자는 초장(cm), 괴경수(개수), 괴경무게(g), 수확량(t/ha)을 조사하고, 배추는 초장(cm), 엽폭(cm), 엽수(개수), 구폭(cm), 구고(cm), SPAD(지수), 결구 유무(%), 무게(g), 수확량(t/ha)을 조사하였다.

2.4. 통계분석

암모니아 휘발과 영향요인 간의 관계를 평가하기 위해 Python software를 사용하여 Pearson의 상관분석을 수행하였다. 상관관계 분석의 heat map은 Python 소프트웨어를 이용하여 Pearson의 상관계수를 기반으로 구성하였다. 상관관계 분석에서 고려되는 영향요인은 기온(Air_Temp), 토양 온도(SL_Temp), 토양 수분함량(SL_Water), 습도(Humidity), 암모니아 휘발량(NH₃), 풍속(Wind), 강수량(Rainfall) 등이 있다. 암모니아 휘발 예측에서 각 환경 요인의 중요성을 확인하기 위해 두 가지 머신러닝 모델인 Random forest (RF)와 Gradient boosting (GBST)을 적용하였다. RF와 GBST 모델을 훈련하기 위해 실험 데이터는 누락된 값이 없도록 처리하였다. 모델 훈련에 사용된 요인은 상관분석과 동일하며, CM과 CF는 시비 비료량에 따라 3개의 범주로 구분하였다. 모델 학습에 앞서 데이터를 실험군과 대조군의 분포 기준으로 8:2 비율로 훈련 세트 및 테스트 세트로 나누었다. RF와 GBST 모델은 각 모델의 hyperparameters를 최적화하기 위해 랜덤 검색 방법을 적용하여 훈련되었다. 비선형 기계 학습 모델을 효과적으로 교육하기에는 데이터의 크기가 비교적 작아 평균 절대 오차(MAE)를 기반으로 모델 학습을 최적화하였다. 작물의 생육특성에 대한 유의성을 평가하기 위해 일원 분산 분석(ANOVA)을 사용하여 Duncan의 다중 범위 테스트(p=0.05)로 비료 처리에 따른 유의한 차이를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CM과 CF 시비량에 따른 암모니아 휘발

작물(감자, 배추) 재배기간 동안 서로 다른 2가지 비료(CM, CF)에 의한 암모니아의 휘발 조사 결과는 Fig. 2에, 강우 및 기온은 Fig. 3에 나타내었다. 밭에서 암모니아 휘발은 대조군과 비교하여, CM과 CF의 시비는 암모니아 휘발량을 증가시켰다. CM 및 CF의 암모니아 휘발에서 비료 시비 초기 비교적

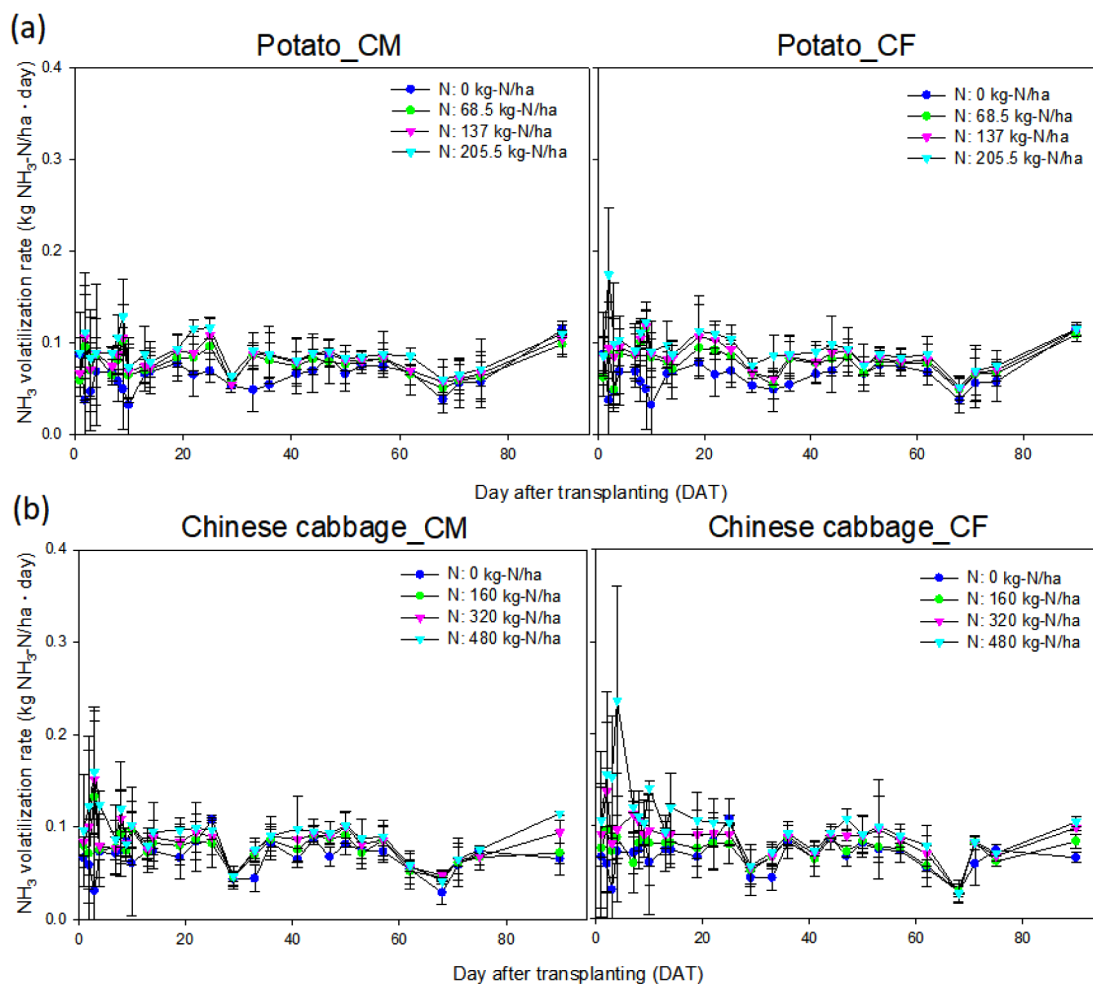


Fig. 2. The ammonia emission from CM (left column) and CF (right column) fertilizer during the cultivation of (a) potato, (b) Chinese cabbage.

높은 암모니아 휘발 첨두값이 관찰되었는데, 이는 강우 후 토양의 수분함량 증가로 인한 비료의 용해로 빠른 암모니아화가 진행된 것으로 기인된다.³⁴⁾ Fig. 3을 보면, 5~7일째에 강우가 발생한 것을 확인할 수 있는데, Fig. 2에 따르면, 강우가 발생한 5~7일 때 암모니아 휘발이 감소하다가 8, 9일째에 다시 증가해 첨두 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 비료가 토양에 용해되어 휘산 될 때 토양의 수분함량은 매우 중요한 인자로 작용하고, 수분함량이 높을수록 암모니아 배출량이 증가한다.³⁵⁾ 작물과 관계없이 CM과 CF 모두에서 작물 재배 기간 동안 0.05~0.09 kg-N/ha·day 범위에서 47일간 지속적인 암모니아 휘발이 관찰되었다. 이와 유사한 결과로 Soares는 비료 시비 초기의 적은 강우는 암모니아 휘발을 감소시키지만, 휘발이 일어나는 시간을 증가시킬 수 있다고 보고했다.³⁶⁾ CM 및 CF의 암모니아 휘발 양상은 유사하지만, 초기 비교적 높은 암모니아 휘발 첨두 값은 CF에서 더 높게 관찰되었다. 암모니아 휘발 첨두 값은 질소 시비량에 따라 다르게 관찰되었다. 감자 재배 중 암모니아 휘발량은 비료 시비 후 9일째에 CM_1.0과 CF_1.0에서 가장 높았으며,

CM_1.5 및 CF_1.5에서는 비료 시비 후 9일째 및 2일째에 가장 높았다. 배추에서의 암모니아 휘발 첨두 값은 비료 시비 후 3일째, 2일째에 CM_1.0과 CF1.0에서 나타났으며, 배추에

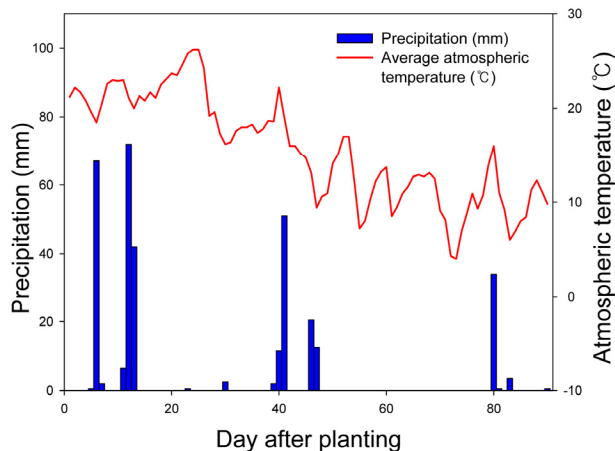


Fig. 3. Rainfall (mm) and temperature (°C) during the cultivation of potato and Chinese cabbage.

Table 1. Total ammonia volatilization and total ammonia emission ratio in potato and Chinese cabbage.

Total ammonia volatilization, (emission ratio)	Potato (kg NH ₃ -N/ha, %)	Chinese cabbage (kg NH ₃ -N/ha, %)
Control	6.42	5.92
CM_0.5N	7.01 (10.23%)	6.58 (4.11%)
CM_1.0N	7.44 (5.43%)	7.28 (2.28%)
CM_1.5N	8.05 (3.92%)	7.96 (1.66%)
CF_0.5N	7.32 (10.68%)	6.49 (4.05%)
CF_1.0N	7.79 (5.69%)	7.43 (2.32%)
CF_1.5N	8.40 (4.09%)	8.26 (1.72%)

서 감자보다 암모니아 휘발 첨두 값이 빠르게 나타났다.

3.2. 암모니아 배출량 및 암모니아 배출계수 비교

감자와 배추밭에서 발생한 총 암모니아 배출량(kg NH₃-N/ha) 및 배출률(%)을 Table 1에 나타내었다. CM과 CF의 질소 비료 시비량이 증가할수록 암모니아 배출량은 증가하였다. 이와 유사하게 Yu는 질소 비료 시비량이 증가함에 따라 암모니아 휘발률과 누적 휘발량이 증가한다고 보고하였다.²⁴⁾ 그러나 질소 비료 투입량 대비 암모니아 배출률은 총 암모니아 배출량과 반대로 질소 비료 시비량이 증가함에 따라 감소하였다. 이는 암모니아 배출량의 증가에도 불구하고 시비 된 질소 비료

의 양이 증가했기 때문에 시비한 질소 비료 시비량에 대한 암모니아 배출률이 감소했다. 암모니아 휘발량은 질소 시비량과 직접적인 관계를 보이지 않았는데, 이는 탈질, 표면유출, 침출 및 작물 흡수를 포함한 여러 경로를 통해 질소 손실 및 질소 이용이 발생하기 때문이다.³⁷⁾

식 (4)를 통해 산정한 암모니아 배출계수를 Fig. 4에 나타냈다. 감자밭에서 CM 사용에 의한 배출계수는 0.0078 NH₃-N kg/N kg로, CF 사용에 의한 배출계수는 0.0091 NH₃-N kg/N kg로 나타났다. 배추밭에서 CM 사용에 의한 배출계수는 0.0044 NH₃-N kg/N kg로, CF 사용에 의한 배출계수는 0.0051 NH₃-N kg/N kg로 CM과 CF 사이의 배출계수는 큰 차이를 보이지 않았다. 감자밭에서 암모니아 휘발량은 배추밭과 큰 차이가 없었지만, 암모니아 배출률 및 암모니아 배출계수는 감자밭에서 배추밭보다 약 1.5~2배가량 높았다. 이는 토양의 암모니아태 질소(NH₄⁺-N) 함량에 영향으로 설명된다(Table 2). 토양의 NH₄⁺-N은 암모니아 휘발에 영향을 미치는 중요 요소 중 하나이며, 토양의 NH₄⁺-N가 증가할수록 암모니아의 휘발이 증가하는 이전 연구 보고가 있다.³⁸⁾ 또한, Yang³⁹⁾은 밭에서 암모니아 배출이 토양의 NH₄⁺ 농도에 크게 의존한다고 보고했다. 본 연구의 실험 결과 실험 전 토양의 NH₄⁺-N가 실험 후 감자밭과 배추밭의 토양에서 급격히 증가하였으며, 감자밭 토양의 NH₄⁺-N가 배추밭 토양의 NH₄⁺-N보다 더 높은

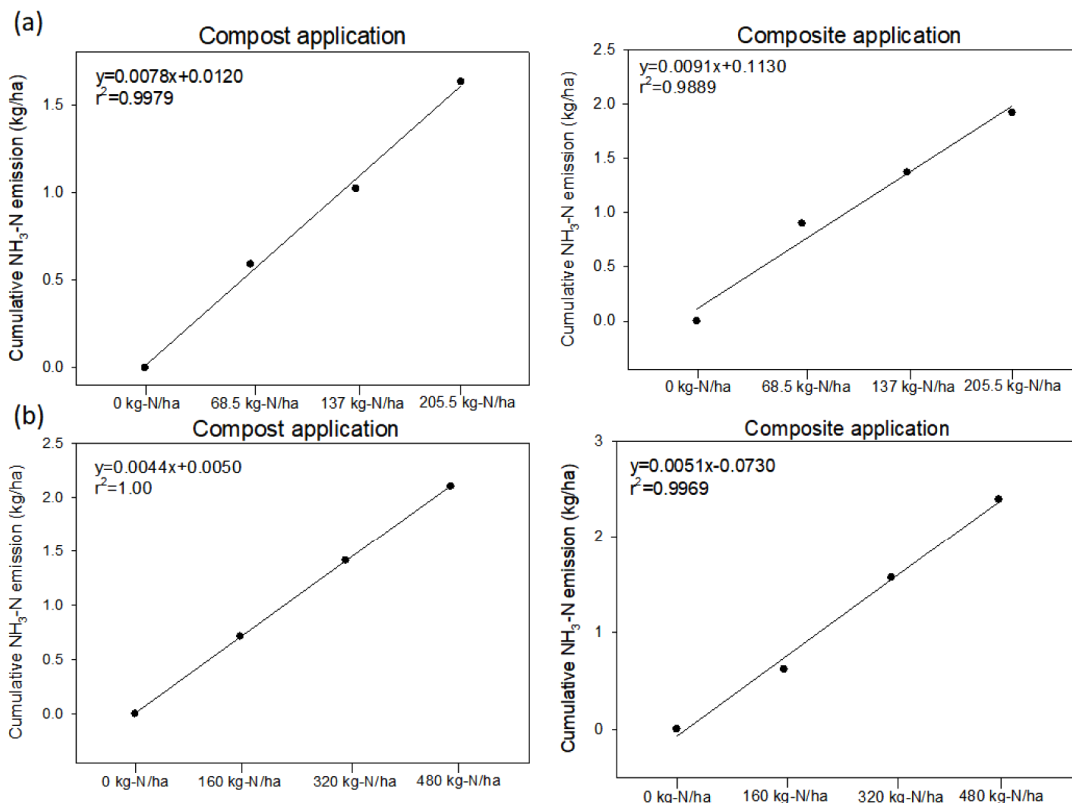


Fig. 4. Quantification of ammonia emission factor (slope of graph; NH₃-N kg/N kg) according to fertilizer use in (a) potato and (b) Chinese cabbage fields (left: CM, right: CF).

Table 2. Soil analysis before and after experiments in potato and cabbage fields.

Parameters	Soil before experiment	soil after experiment							
		Control	CM_0.5N	CM_1.0N	CM_1.5N	CF_0.5N	CF_1.0N	CF_1.5N	
Potato	pH (H ₂ O, 1:5)	5.4	5.5	6.1	5.9	6.1	5.2	5.6	5.6
	EC (uS/m)		40.2	28.2	18.1	74.8	74.7	58.1	81.2
	Organic matter (g/kg)	40.3	6.7	7.1	5.4	11.4	7.4	9.7	7.1
	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	43.4	112.1	112.1	103.16	119.1	105.1	126.1	91.1
	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	43.3	210.2	147.1	203.1	175.1	189.1	154.1	182.1
Chinese Cabbage	pH (H ₂ O, 1:5)	5.4	5.1	5.8	6.0	5.4	5.2	5.0	5.2
	EC (uS/m)		52.9	22.0	59.4	24.0	59.0	189.9	108.3
	Organic matter (g/kg)	40.3	3.7	8.7	14.1	10.1	5.4	5.0	3.0
	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	43.4	91.1	84.1	98.1	63.1	77.1	91.1	84.1
	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	43.3	140.1	182.1	133.1	189.1	154.1	322.2	252.2

함량을 나타냈고, 이는 Zhang³⁸⁾ 등의 연구결과와 일치한다.

3.3. 암모니아 휘발에 영향을 미치는 요인과의 상관관계 분석

본 연구에서는 암모니아 휘발에 영향을 미치는 요인들 사이의 관계를 조사하기 위해 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 수행하였다. 피어슨 상관관계 분석은 잠재적으로 중요한 요인을 식별하고 단일 독립 변수로 간단한 예측 모델 개발에 유용하다.⁴⁰⁾ 실제로 일부 연구자는 암모니아 휘발과 지표 수 특성 사이의 관계를 조사하기 위해서 피어슨 상관분석을 실시하였다.⁴⁰⁾ Fig. 5는 피어슨 상관분석 결과를 heat map으로 나타낸 것이다. 감자와 배추에서(Fig. 5 a-b) 가장 강한 양의 상관관계는 기온과 토양온도 사이(상관계수: 0.96)에 관찰되었다. 토양 온도와 풍속 사이에 강한 양의 상관관계(감자, 배추에서 상관계수: 0.4)가 관찰되었다. 습도는 강수량과 토양 수분함량(SL_Water), 온도 매체인 토양온도(SL_Temp), 공기온도(Air_Temp) 모두에서 양의 상관관계가 확인되었다. 이러한 결과는 한국의 계절적 특성인 여름철에 기온과 습도가 높아지는 환경 때문이다. 감자와 배추에서 암모니아 휘발(NH₃)과 환경 요인 사이의 상관관계는 유사하게 토양 온도, 기온, 토양 수분함량, 풍속과 비교적 높은 양의 상관관계가 있었다. 반면에, 토양 수분함량에서 감자와 배추 각각 상관계수가 0.098, 0.42, 풍속에서 감자와 배추 각각 상관계수가 0.37, 0.12로 상관계수 값의 차이가 있었다.

3.4. 암모니아 휘발에 영향을 미치는 요인의 중요도 평가

널리 사용되는 두 가지의 머신 러닝 알고리즘인 RF와 GBST를 사용하여 밭에서 암모니아 휘발에 영향을 미치는 주요 매개변수를 식별하였다. 두 가지 머신러닝 알고리즘(RF, GBST)을 통한 매개변수의 중요도는 두 모델 간의 해당 중요도 값이 최소한의 차이를 나타냈다. RF 알고리즘은 의사결정 나무를 결합하여 하나의 의사결정 나무보다 더 우수한 예측 성능을 가지는 모델이며, 의사결정나무는 계층적 구조의 여러

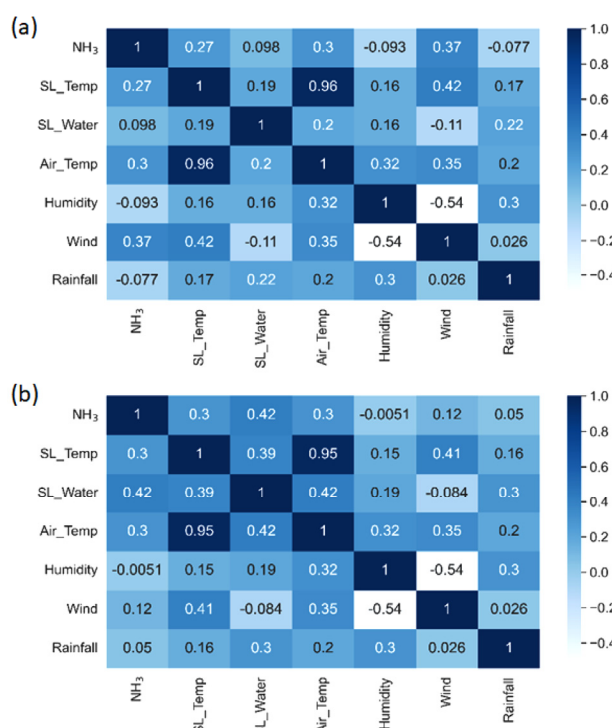


Fig. 5. Correlation coefficient between ammonia volatilization and influencing factors of ammonia volatilization in (a) potato and (b) Chinese cabbage. Note: Indigo represent a positive correlation and white represent a negative correlation.

의사결정 규칙들을 이용하여 예측을 실시한다.^{41,42)} GBST는 RF와 달리 의사결정나무를 순차적으로 학습시키는 모델로 이전 의사결정나무가 잘못 예측한 부분을 다음 의사결정나무가 보완하는 방식으로 잘못 예측하는 부분을 점차 줄여나간다.⁴³⁾ 이러한 RF와 GBST의 모델 학습 방법 차이에 의해 두 모델의 예측 결과에서 차이를 발생시킬 수 있다. Fig. 6은 RF 및 GBST 모델에 의해 결정된 매개변수의 중요도를 보여준다. 감자에서 암모니아 휘발에 가장 높은 영향력을 기여 하는 요인은 토양 온도이며, 그다음으로 토양 수분 및 CF 시비의 중요도가 높게 나타났다. He의 연구에 따르면, 토양의 온도 증

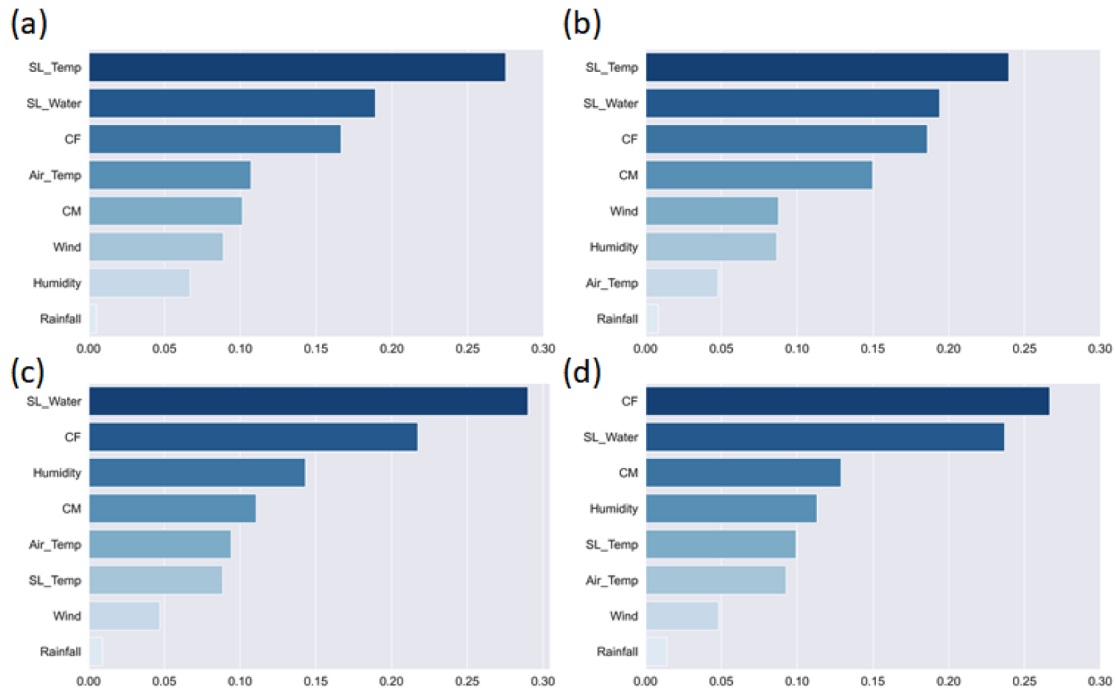


Fig. 6. Feature importance obtained by a random forest model (left) and gradient boosting (right) in predicting the amount of ammonia emissions from (a-b) potato, and (c-d) Chinese cabbage. Note: CM is Compost manure and CF is Composite fertilizer.

가는 NH₄에서 NH₃로의 화학반응 속도와 NH₃의 확산 속도를 증가시킨다.⁴⁴⁾ Al-Kanani⁴⁵⁾는 토양에 질소 비료를 사용 한 후 토양 수분의 함량이 증가하면, 토양 수분이 포화상태에 이를 때까지 암모니아 배출이 선형적으로 증가한다고 보고하였다. 배추에서의 환경 매개변수의 중요도 분석결과에서는 두 가지 머신러닝 모델 간 상위 순위가 조금 다르게 나타났다. RF에서는 토양 수분 및 질소 비료인 CF 시비의 중요도가 높게 나타

났는데, GBST 결과 CF의 중요도가 가장 높으며, 다음으로 토양 수분 및 CM 시비의 중요도가 높은 것으로 확인되었다. CF의 시비가 CM의 시비보다 암모니아의 휘발 중요도가 더 높은 이유는 CM에서는 유기물 분해로 인해 질소의 광물화가 느리게 일어나고, 미생물에 의해 질소가 방출되지 않고 고정 되어 휘발이 감소할 수 있기 때문이며⁴⁶⁾, 암모니아 휘발에서 CM보다 높은 CF의 중요도는 3.2에서 요약된 CF에서 CM보

Table 3. Phenotypic analysis of several key growth characteristics in crops grown under different nitrogen fertilizer and nitrogen content applications. Different letters indicate significant differences according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

	Parameters	Control	CM_0.5N	CM_1.0N	CM_1.5N	CF_0.5N	CF_1.0N	CF_1.5N
Potato	Plant length (cm)	46.3 ^{cd} ±9.1	44.3 ^d ±4.0	58.0 ^{abc} ±4.6	53.3 ^{bcd} ±9.1	56.3 ^{bcd} ±9.7	64.3 ^{ab} ±2.1	69.7 ^a ±3.2
	Tuber yield (t/ha)	23.8±2.2	24.8 ^c ±3.9	32.8 ^b ±2.3	34.4 ^b ±2.3	26.3±2.5	34.1 ^b ±1.6	44.2 ^a ±4.3
	Tuber number	3.7 ^b ±0.6	4.7 ^{ab} ±0.6	5.0 ^a	5.3 ^a ±0.6	4.3 ^{ab} ±0.6	4.7 ^{ab} ±0.6	4.3 ^{ab} ±0.6
	Tuber weight (g)	253.7 ^c ±23.0	263.3 ^c ±41.6	349.0 ^b ±24.6	365.7 ^b ±24.0	280.0 ^c ±26.5	363.0 ^b ±15.6	470.0 ^a ±45.8
Chinese cabbage	Leaf length (cm)	18.0 ^d ±1.0	17.7 ^d ±0.6	19.7 ^d ±1.2	33.0 ^c ±1.0	50.7 ^{ab} ±3.1	50.0 ^b ±1.0	53.3 ^a ±2.5
	Leaf width (cm)	9.3 ^e ±0.6	8.3 ^e ±0.6	11.0 ^d ±1.0	16.7 ^c ±0.6	26.0 ^b ±1.0	25.7 ^b ±0.6	29.3 ^a ±0.6
	Leaf number	10.7 ^d ±0.6	10.7 ^d ±0.6	23.3 ^c ±1.5	44.3 ^b ±1.2	52.3 ^b ±6.0	65.3 ^a ±3.1	72.3 ^a ±12.1
	yield (t/ha)	31.3 ^e ±4.8	37.3 ^e ±3.9	52.0 ^e ±3.8	137.9 ^d ±19.6	203.0 ^c ±32.3	255.4 ^b ±9.1	329.0 ^a ±24.9
	Weight (g)	0.3 ^e ±0.1	0.4 ^e	0.6 ^e	1.5 ^d ±0.2	2.2 ^c ±0.3	2.7 ^b ±0.1	3.5 ^a ±0.3
	Bulb width (cm)	0 ^e	0 ^e	7.3 ^d ±1.2	16.7 ^c ±1.5	20.0 ^c	17.0 ^c ±1.0	25.0 ^a ±1.0
	Blub height (cm)	0 ^e	0 ^e	16.7 ^d ±1.5	24.0 ^c ±1.0	26.7 ^b ±1.2	28.3 ^b ±0.6	33.0 ^a ±2.6
	Open head (%)	0 ^c	0 ^c	0 ^e	20 ^b	100 ^a	100 ^a	100 ^a
	SPDA (chlorophyll color)	24.4 ^d ±0.6	24.0 ^d ±1.0	22.4 ^d ±2.5	29.7 ^c ±1.7	44.4 ^b ±1.1	45.1 ^b ±1.1	50.3 ^a ±1.2

다 높은 총 암모니아 휘발량과 일치하며, CF가 CM보다 암모니아 배출에 뚜렷한 영향을 미친다는 것을 의미한다. RF와 GBST에 따른 중요도 분석을 통해 암모니아 휘발을 감소시키기 위해서는 강우 발생 시기를 고려하여 비가 내리지 않을 때에 질소 비료를 시비하고, 질소 비료 시비 직후에 대해 토양 수분에 대한 적절한 관리가 필요하다.

3.5. CM과 CF의 시비량에 따른 작물의 생육특성 조사

감자와 배추의 생육특성을 분석하여 서로 다른 두 가지 질소 비료(CM, CF)가 작물의 생육 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 감자와 배추의 생육특성은 Table 3에 요약되어 있으며, 질소 비료 처리 간의 유의미한 차이는 던칸(Duncan)의 다중범위분석을 사용하여 결정하였다. Fig. 7은 뚜렷한 차이가 있는 생육특성을 나타낸다. 감자의 여러 가지 생육특성에서 CF의 시비량에 따른 수확량, 초장, 괴경 무게는 유의미한 차이를 나타냈다. CM의 시비량이 증가함에 따라 수확량과 괴경 무게가 증가하였지만, 유의미한 차이는 보이지 않았다(Fig. 7 a-c). 배추 작물의 특성은 CF 시비량에 따라 수확량 및 무게에서, CM 시비량에 따라 구고 및 구 폭에서 현저한 차이를 보였다. 이러한 생육특성은 질소 비료 시비량이 증가할수록 더 높은 값을 나타냈다. 기존 문헌에서도 질소 시비량이 증가함에 따라 작물 수확량이 증가하는 것을 확인할 수 있지만, 일부 연구에서는 과도한 질소 시비량이 곡물의 수확량을 저하할 수 있다는 상반된 결과도 보고되었다.^{13,47,48} 이는 적절한 질소

비료 시비의 중요성을 시사한다. 모든 생육특성에서 CM보다 CF를 적용했을 때 더 높은 값을 나타냈다(Fig. 7 f-h). 특히 배추의 수확량에서 CM보다 CF 적용의 수확량(CM_1.0N, CF_1.0N)이 약 5배 이상 높았으며, 이는 CM의 단일 적용이 작물 생육에 충분한 양분을 공급할 수 없음을 나타낸다.⁴⁹ Chen은 유기비료의 양분 방출 속도가 느려 작물에 일부 양분 결핍이 발생할 수 있으며, 유기비료에는 식물의 주요 영양소가 최대로 유지될 만큼 충분하지 않다는 보고 결과와도 일치한다.⁵⁰

4. 결론

질소는 작물 생육에 필수적인 영향요소지만 토양에서 암모니아가 휘발되면 대기 중에 미세먼지 및 오존과 같은 2차 오염 물질이 형성된다. 특히 농업용 비료는 상당한 양의 암모니아를 대기 중으로 방출하여 대기 오염을 유발하고 질소 이용률을 감소시킨다. 따라서 암모니아 생성에 영향을 미치는 요인을 조사하는 동시에 질소 비료 종류 및 특정 작물에 따른 암모니아 휘발을 모니터링 하여 암모니아 휘발을 완화하기 위한 조치를 정확하게 평가하고 구현하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 감자와 배추 재배 시 암모니아 휘발을 모니터링하고, 토양 특성을 분석하였다. 비료 시비 초기에 발생한 강우는 암모니아 휘발을 촉진했다. 배추밭보다 높은 감자밭의 암모니아 배출률 및 배출계수는 배추밭보다 감자밭 토양의 NH₄⁺-N의 함량이

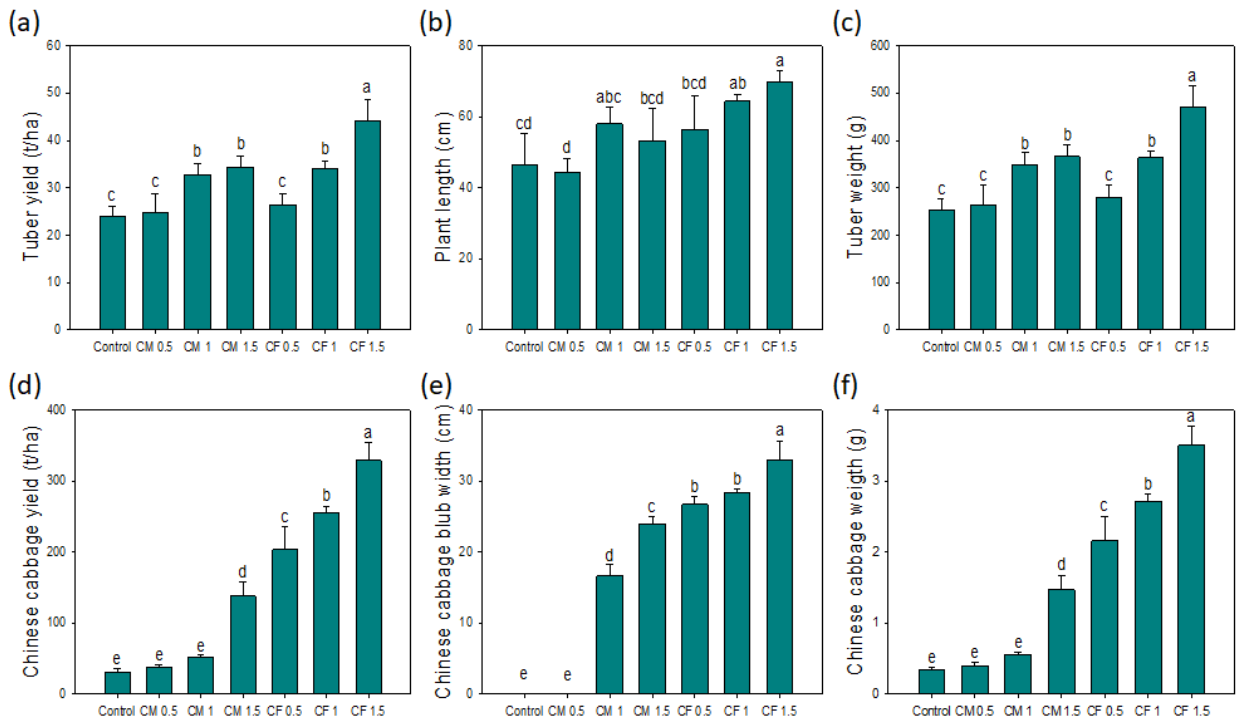


Fig. 7. Phenotypic analysis of key agronomic characteristics in (a-c) potato, and (d-f) Chinese cabbage grown under different nitrogen fertilizer and nitrogen content applications. Different letters indicate significant differences according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

많기 때문이다. 토양 온도 및 토양 수분은 암모니아 휘발에 중요한 역할을 한다. 수확한 감자와 배추의 생육특성을 분석한 결과, 질소비료 시비량의 증가는 감자와 배추의 생육에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 하지만, CM의 단일 적용은 작물 생육에 필요한 양분을 충분히 공급할 수 없었다. 본 연구에서 얻은 암모니아 배출량에 대한 정량적 데이터를 통해 농업에서 암모니아 배출량의 기여도를 확인할 수 있다. 또한, 암모니아 휘발에 영향을 미치는 요인을 파악함으로써 암모니아 배출량을 줄이기 위한 방안을 제시할 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ016998)의 지원을 받아 연구되었음.

Reference

1. L. Ma, F. Wang, W. Zhang, W. Ma, G. Velthof, W. Qin, O. Oenema, F. Zhang, Environmental assessment of management options for nutrient flows in the food chain in China. *Environ. Sci. Technol.*, 47(13), 7260-7268 (2013).
2. M. Tegeder, C. Masclaux-Daubresse, Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use. *New Phytol.*, 217(1), 35-53(2018).
3. P. P. Motavalli, K. W. Goyne, R. P. Udawatta, Environmental impacts of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers. *Crop manag.*, 7(1), 1-15(2008).
4. S. Liu, F. Lin, S. Wu, C. Ji, Y. Sun, Y. Jin, S. Li, Z. Li, J. Zou, A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO_x N₂O emissions. *Global Change Biology*, 23(6), 2520-2532(2017).
5. X. Lyu, T. Wang, X. Song, C. Zhao, R. M. Rees, Z. Liu, J. Xiaotang, K. H. Siddique, Reducing N₂O emissions with enhanced efficiency nitrogen fertilizers (EENFs) in a high-yielding spring maize system. *Environ. Pollut.*, 273, 116422(2021).
6. G. Chen, Y. Chen, G. Zhao, W. Cheng, S. Guo, H. Zhang, W. Shi, Do high nitrogen use efficiency rice cultivars reduce nitrogen losses from paddy fields?. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 209, 26-33(2015).
7. S. Huang, W. Lv, S. Bloszies, Q. Shi, X. Pan, Y. Zeng, Effects of fertilizer management practices on yield-scaled ammonia emissions from croplands in China: a meta-analysis. *Field Crops Res.*, 192, 118-125(2016).
8. M. Cambra-López, A. J. Aarnink, Y. Zhao, S. Calvet, A. G. Torres, Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. *Environ. Pollut.*, 158(1), 1-17(2010).
9. J. L. Peel, R. Haeuber, V. Garcia, A. G. Russell, L. Neas, Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health. *Biogeochemistry*, 114, 121-134(2013).
10. X. Wang, Z. Bai, Y. Yao, B. Gao, D. Chadwick, Q. Chen, C. Hu, L. Ma, Composting with negative pressure aeration for the mitigation of ammonia emissions and global warming potential. *J. Clean. Prod.*, 195, 448-457(2018).
11. S. V. Krupa, Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environ. Pollut.*, 124(2), 179-221(2003).
12. A. Fortems-Cheiney, G. Dufour, K. Dufossé, F. Couvidat, J. M. Gilliot, G. Siour, M. Beekmann, G. Foret, F. Meleux, L. Clatisse, P. F. Coheur, M. V. Damme, C. Clerboux, S. Générumont, Do alternative inventories converge on the spatiotemporal representation of spring ammonia emissions in France?. *Atmos. Chem. Phys.*, 20(21), 13481-13495(2020).
13. J. Lee, S. Choi, Y. Lee, S. Y. Kim, Impact of manure compost amendments on NH₃ volatilization in rice paddy ecosystems during cultivation. *Environmental Pollution*, 288, 117726(2021).
14. J. Xu, S. Peng, S. Yang, W. Wang, Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements. *Agric. Water Manag.*, 104, 184-192(2012).
15. X. Deng, T. Xu, L. Xue, P. Hou, L. Xue, L. Yang, Effects of warming and fertilization on paddy N₂O emissions and ammonia volatilization. *Agric Ecosyst Environ.*, 347, 108361 (2023).
16. L. C. Medina, J. B. Sartain, T. A. Obreza, W. L. Hall, N. J. Thiex, Evaluation of a soil incubation method to characterize nitrogen release patterns of slow-and controlled-release fertilizers. *J. AOAC Int.*, 97(3), 643-660(2014).
17. D. E. Pelster, D. Watt, I. B. Strachan, P. Rochette, N. Bertrand, M. H. Chantigny, Effects of initial soil moisture, clod size, and clay content on ammonia volatilization after subsurface band application of urea. *J. Environ. Qual.*, 48(3), 549-558 (2019).
18. R. Harrison, J. Webb, A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions. *Adv. Agron.*, 73, 65-108(2001).
19. Y. H. Lee, S. U. Park, Estimation of ammonia emission in South Korea. *Water Air Soil Pollut.*, 135, 23-37(2002).
20. T. Miao, B. Wang, A. Cai, T. Ren, Y. Wan, Y. Meng, Y. Li, Large differences in ammonia emission factors between greenhouse and open-field systems under different practices across Chinese vegetable cultivation. *Sci. Total Environ.*, 852, 158339(2022).
21. S. C. Hong, J. H. Kim, M. W. Kim, Estimation of ammonia emission with compost application in plastic house for leafy perilla cultivation, *Korean J. Environ. Agric.*, 40(4), 149-160 (2021).
22. M.W. Kim, S. C. Hong, J. H. Kim, Evaluation of ammonia emission coefficient according to the use of compound fertilizers when cultivating apples and pears in orchards, *Korean J. Environ. Agric.*, 40(4), 366-372(2021).
23. RDA (Rural Development Administration, Korea). Fertilization standard of crop plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (1999).
24. Q. G. YU, Y. E. Jing, S. N. YANG, J. R. FU, J. W. Ma, W. C. SUN, L. N. JIANG, Qiang, WANG, Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization. *Rice Sci.*, 20(2), 139-147(2013).

25. Y. Yang, C. Zhou, N. Li, K. Han, Y. Meng, X. Tian, L. Wang, Effects of conservation tillage practices on ammonia emissions from Loess Plateau rain-fed winter wheat fields. *Atmos. Environ.*, 104, 59-68(2015).
26. Y. Zhang, X. Han, N. He, M. Long, J. Huang, G. Zhang, Q. Wang, X. Han, Increase in ammonia volatilization from soil in response to N deposition in Inner Mongolia grasslands. *Atmos. Environ.*, 84, 156-162(2014).
27. MOE (Ministry of Environment). Korea Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Sejong, Korea. (2017).
28. G. Yang, H. Ji, J. Sheng, Y. Zhang, Y. Feng, Z. Guo, L. Chen, Combining Azolla and urease inhibitor to reduce ammonia volatilization and increase nitrogen use efficiency and grain yield of rice. *Sci. Total Environ.*, 743, 140799(2020).
29. J. Gu, M. Yuan, J. Liu, Y. Hao, Y. Zhou, D. Qu, X. Yang, Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China. *Sci. Total Environ.*, 595, 371-379(2017).
30. R. Ma, J. Zou, Z. Han, K. Yu, S. Wu, Z. Li, S. Liu, S. Niu, W. R. Horwath, X. Zhu-Barker, Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: A refinement based on regional and crop-specific emission factors. *Glob Chang Biol.*, 27(4), 855-867(2021).
31. RDA (Rural Development Administration), Method of Soil Chemical Analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (2010).
32. RDA (Rural Development Administration), Standard Investigation Methods for Agriculture Experiment. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (1995).
33. T. R. Waghmode, M. M. Haque, S. Y. Kim, P. J. Kim, Effective suppression of methane emission by 2-bromoethanesulfonate during rice cultivation. *PLoS One*, 10(11), e0142569(2015).
34. M. Wahl, R. Kirsch, U. Brockel, S. Trapp, M. Bottlinger, Caking of urea prills, *Chem. Eng. Technol.*, 29(6), 674-678(2006).
35. L. Shan, Y. He, J. Chen, Q. Huang, H. Wang, Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China. *J Environ Sci.*, 38, 14-23(2015).
36. J. R. Soares, H. Cantarella, M. L. D. C. Menegale, Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biol. Biochem.*, 52, 82-89(2012).
37. J. Xu, S. Peng, S. Yang, W. Wang, Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements. *Agric. Water Manag.*, 104, 184-192(2012).
38. X. Zhang, Y. Zhang, H. Zhang, K. Wang, Y. Tan, G. Xiao, F. Meng, Various quantification methods for estimating ammonia volatilization from wheat-maize cropping system. *J. Environ. Manage.*, 311, 114818(2022).
39. Y. Yang, X. Ni, B. Liu, L. Tao, L. Yu, Q. Wang, Y. Yang, J. Liu, Y. Wu, Measuring field ammonia emissions and canopy ammonia fluxes in agriculture using portable ammonia detector method. *J. Clean. Prod.*, 216, 542-551(2019).
40. P. Li, J. Lu, Y. Wang, S. Wang, S. Hussain, T. Ren, R. Cong, X. Li, Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 251, 78-87(2018).
41. Y. L. Pavlov, Random forests. *Random Forests*, 1-122(2019).
42. S. S. Rathore, S. Kumar, A decision tree regression based approach for the number of software faults prediction. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 41(1), 1-6(2016).
43. J. H. Friedman, Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics & Data Analysis*, 38(4), 367-378(2002).
44. Z. L. He, A. K. Alva, D. V. Calvert, D. J. Banks, Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH. *Soil Sci.*, 164(10), 750-758(1999).
45. T. Al-Kanani, A. F. MacKenzie, N. N. Barthakur, Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55(6), 1761-1766(1991).
46. L. Xia, S. K. Lam, X. Yan, D. Chen, How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?. *Environ. Sci. Technol.*, 51(13), 7450-7457(2017).
47. X. Zhang, S. Yin, Y. Li, H. Zhuang, C. Li, C. Liu, Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China. *Sci. Total Environ.*, 472, 381-388(2014).
48. Y. Zhong, X. Wang, J. Yang, X. Zhao, X. Ye, Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields. *Sci. Total Environ.*, 565, 420-426(2016).
49. K. Song, Y. Xue, X. Zheng, W. Lv, H. Qiao, Q. Qin, J. Yang, Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil. *Sci. Rep.*, 7(1), 1164(2017).
50. J. H. Chen, The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. In *International workshop on sustained management of the soil-rhizosphere system for efficient crop production and fertilizer use*, Land Development Department, Bangkok, Thailand, Vol. 16, No. 20, pp. 1-11(2006).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Yeon-Jin Lee

Department of Bioresources and Rural system Engineering, Hankyong national University, Master degree student, ORCID[®] 0000-0001-8908-9387: Writing - original draft. Visualization,

Resources

Eun-Chae Im

Department of Bioresources and Rural system Engineering,
Hankyoung national University, Bachelor degree student, [ORCID](#)[®]
0000-0002-0396-7909: Resources

Sung-Chang Hong

Climate change assessment division, National Institute of
Agricultural Sciences, Rural Development Agency, Researcher,
[ORCID](#)[®] 0000-0002-9042-1284, Resources

Seong-Jik Park

Department of Bioresources and Rural system Engineering,
Hankyoung national University, Professor, [ORCID](#)[®]0000-0003-
2122-5498: Corresponding author, Writing - review and editing,
Funding acquisition, Project administration