

Simulation of Nitrate Leaching Under Soybean and Chinese Cabbage Cultivation in the Lysimeter Soils Using the APEX Model

Yejin Lee^{1*}, Soonkun Choi², and Jae E. Yang^{3*}

¹Researcher, Division of Soil & Fertilizer, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea

²Researcher, Division of Climate Change Assessment, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea

³Professor, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

*Corresponding author: Jae E. Yang, yangjay@kangwon.ac.kr

*Co-corresponding author: Yejin Lee, leeyj418@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 25, 2020

Revised: November 18, 2020

Accepted: November 18, 2020

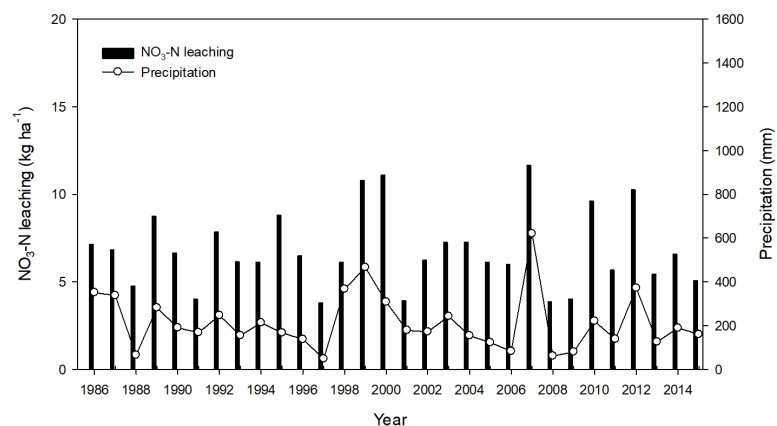
ORCID

Yejin Lee

<http://orcid.org/0000-0003-4415-846X>

Nitrate leaching losses from arable land can negatively impact ground water quality. Prediction of nitrate leaching with agricultural system model is helpful to manage the crop land for reduction of nitrate leaching. In this study, APEX (Agricultural Policy Environmental eXtender) model was evaluated for simulating the nitrate leaching potential in agricultural land. The model for nitrate leaching prediction was calibrated and validated with the data from the lysimeter in National institute of agricultural science, Rural development administration. The nitrate-N leaching during cropping season of soybean (Jun to October) and Chinese cabbage (September to October) in lysimeter was simulated from 1986 to 2015 with the adjusted model. The measured (x) and simulated (y) total nitrate-N leaching that was accumulated during cropping period in lysimeter was significantly correlated ($n = 9$, $y = 0.9275x$, $R^2 = 0.948$). The range of total nitrate-N leaching according to soybean and Chinese cabbage cultivation was $0 - 4 \text{ kg ha}^{-1}$ and $3.8 - 11.6 \text{ kg ha}^{-1}$, respectively. Thus, we confirmed the APEX model reflects differences in nitrate leaching potential under the different types of crop and fertilization. These results suggest that APEX model can be successfully used in estimating nitrate leaching of arable land.

Keywords: APEX model, Nitrate leaching, Lysimeter, Upland soils



Simulated $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching by APEX model and precipitation during cropping season of Chinese cabbage(fall) from 1986 to 2015 in the lysimeter.



Introduction

우리나라 주요 밭작물 재배농가는 농촌진흥청에서 권장하는 작물별 비료사용기준 대비 2.6배 많은 질소 비료를 사용하고 있다 (Kim et al., 2020). 농경지에서 과도한 질소비료의 사용은 지하수의 질산태 질소 농도에 영향을 미치고 (Han et al., 2017; Li et al., 2018), 농업용수의 총 질소 함량은 농경지 비율이 많을수록 증가하는 경향이 있다 (Roh et al., 2019). 질소의 수계 유출은 부영양화의 원인이 되며, 질산태 질소로 오염된 지하수는 인간 건강에 유해한 영향을 미치므로 농경지의 질산태 질소 용탈을 줄이는 것은 중요하다 (Mencio et al., 2016; Watanabe et al., 2018).

주요 선진국들은 농경지에서 질소의 수계 이동을 최소화하기 위해 현장 모니터링과 질산태 질소 용탈 모델링을 수행하고, 농경지의 질소 유출을 줄이는 수질관리 정책을 추진하고 있다. 미국 농무성에서는 농경지 유형에 따른 질산태 질소 용탈 지수를 설정하여 유출을 관리하고 있고 (Shaffer and Delgado, 2002), 영국은 농경지 장기 시험포장 연구결과를 질소 용탈 모델링에 적용하여 지하수 관리에 활용하고 있다 (Goulding et al., 2000). 또한 여러 국가에서 농경지 질소 유출량 예측을 위해 RZWQM, SWAT, APSIM 등 다양한 모델을 활용하고 있다 (Ma et al., 2007; Akhavan et al., 2010; Puntel et al., 2016).

국내에서는 수계의 질소 동위원소 분석을 통한 질소 유출원 평가 (Lee et al., 2008; Han, 2009; Park et al., 2015), 라이시미터를 활용한 질산태 질소 이동 평가 (Han et al., 2008; Lee et al., 2018) 등 현장 모니터링 위주의 연구가 수행되었다. 또한 모델을 활용하여 특정 지역의 질산태 질소 용탈을 예측한 사례도 있으나 (Kim et al., 2015), 국내에서 모델을 이용한 농경지의 질산태 질소 용탈 예측 연구는 아직 도입단계이다.

모델을 활용하면 현장에서 측정하기 어려운 항목에 대한 예측이 가능하고, 여러 가지 시뮬레이션을 통해 가장 합리적으로 관리할 수 있는 방안을 모색할 수 있는 이점이 있다. 하지만 모델의 현장 적용을 위해서는 농경지의 토양 특성, 기상 조건, 작물 종류, 비료사용 등 실제 재배여건을 적용했을 때 실측 값과 일치하도록 보정과 검정이 필요하다.

본 연구에서는 미국에서 개발한 농장단위 유역관리 모델인 APEX (Agricultural Policy Environmental eXtender; Williams et al., 2006)를 이용하여 우리나라 밭토양의 질산태 질소 용탈량 예측 가능성을 확인하고자 하였다. 모델 보정을 위해 중량식 라이시미터 실측값을 활용하였고, 30년간 기상자료를 적용하여 질소 용탈량을 모의하였다.

Materials and Methods

APEX 모델 APEX는 침식에 의한 작물 생산성 예측 모델인 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator; Williams et al., 1984)에서 유래되었다. EPIC 모델은 유럽에서 농경지의 질소 용탈을 평가하는데 활용된 사례가 있으며 (Van der Velde et al., 2009), 질소, 인의 수계 이동과 용탈, 휘산, 작물 생산성 등을 예측할 수 있다 (Williams et al., 2006; Kim et al., 2014).

APEX 모델을 이용한 질소 용탈 예측을 위해서는 기상, 토양특성, 작물 재배, 관리방법에 대한 매개변수를 입력해야 한다. 질소 용탈은 지하물 투수량과 토양 층위별 질산태 질소 농도를 곱하여 계산된다. 물 투수량은 농경지의 경사도에 따라 지표면과 지표면 아래로 이동하는 물량이 구분되며, 지표면 아래로 이동한 물은 수평 흐름과 수직 투수로 구분된다. 수직 투수는 근권의 수분함량이 포장용수량을 초과할 때 일어난다고 모의한다. 이 때 작물의 증발산량과 토성 및 유기물 함량에 따른 토양 수분 특성을 반영한 지하물 투수량이 계산되며, 토양 내 수분 이동과 연관된 토양 물리성 매개변수는 Saxton and Rawls (2006)에서 제시한 방법에 따라 구성하였다 (Groenendijk et al., 2014).

APEX 구동을 위한 매개변수 보정 APEX Ver.0806을 이용하였으며, 모델의 매개변수는 Table 1에 제시하였다. 작물 생산성과 증발산량 관련 매개변수인 잠재적 적산온도 (Potential heat unit, PHU), 최대 엽면적지수 (DMLA)는 국립농업과학원에서 작물 생육단계별로 실측한 데이터로 보정하였다. 잠재증발산량은 Hargreaves equation (Hargreaves and Samani, 1985)을 적용하였다.

라이시미터에서는 토양 내에서 수분이 상하로 이동하기 때문에 실제 농장에서의 물 이동과 차이가 있다. APEX 모델은 빗물이 침투되어 수평 이동, 지하 수직이동, 지하에서 위로 이동하는 물량을 구분하기 때문에, 수분의 수평이동을 제한하고 수직적 침투에 의한 질산태 질소 용탈이 되도록 지하 투수량과 복귀류의 비율 (RFP0)을 조정하여 매개변수를 보정하였다. 질산태 질소 용탈 비율 (p14), 지하수로부터 질소 이동 분할 (p74) 매개변수는 국립농업과학원에 설치된 중량식 라이시미터에서 2016년 콩 재배기간 동안 일 단위의 질산태 질소 용탈량 실측값과 모형 예측값을 비교하며 매개변수 값을 조정하였다. 토양 수분저장량에 따른 질소 용탈비 (p4), 탈질에 대한 한계 토양수분 (p35), 질소 휘

Table 1. Values of the input parameters adjusted for APEX model validation.

Categories	Parameter	Description	Range	Value
Crop	PHU	Crop heat units (Potential heat unit)	Crop-related	Chinese cabbage (800) Soybean (1600)
	DMLA	Maximum potential leaf area index	Crop-related	Chinese cabbage (4) Soybean (5)
	HI	Harvest index	Crop-related	Chinese cabbage (0.8) Soybean (0.3)
Evapotranspiration	p34	Hargreaves equation exponent	0.5 - 0.6	0.5
Subsurface flow	RFP0	Return flow/(return flow + deep percolation)	0.05 - 0.95	0.51 (lysimeter : 0.05)
	p14	Nitrate leaching ratio	0.1 - 1	0.5
Nitrogen loss	p74	Partitions Nitrogen flow from ground water	0 - 20	8
	p4	Water storage nitrogen leaching fraction	0 - 1	0.5
	p7	Nitrogen fixation coefficient	0 - 1	0.9
	p35	Denitrification soil water threshold	0.9 - 1.1	1.01
	p72	Volatilization/nitrification partitioning coefficient	0.05 - 0.5	0.4
Soil	HSG	NRCS Soil hydrologic group	1 - 4	2

Table 2. Physical and chemical properties of soils in the lysimeter used for calibration of the APEX model.

Horizons	Depth (cm)	Distribution of soil particle (%)			Bulk density (Mg m ⁻³)	Porosity (%)	Ksat (cm sec ⁻¹)	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	SOM (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)
		Sand	Silt	Clay							
Ap	0 - 13	54.0	37.0	9.0	1.27	52.1	1.94×10^{-4}	6.8	0.3	14.4	1.3
BA1	13 - 26	61.8	30.2	8.0	1.37	48.4	2.8×10^{-5}	5.0	0.2	8.2	0.8
BA2	26 - 41	47.2	40.8	12.0	1.39	47.6	6.7×10^{-5}	5.3	0.1	6.6	0.3
Bw1	41 - 66	61.7	29.3	9.0	1.34	49.4	2.19×10^{-4}	5.7	0.1	5.5	0.3
Bw2	66 - 108	69.2	25.8	5.0	1.34	49.4	2.03×10^{-4}	5.9	0.1	5.4	0.2
C	108 - 150	75.7	19.3	5.0	1.37	48.3	2.86×10^{-4}	5.8	0.1	4.7	0.2

Table 3. References for validation of APEX model.

Crop	Soil texture	Fertilizer application (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O, kg ha ⁻¹)	Rainfall (mm)	Experiment period	Location (Year)
Soybean	Sandy loam	40-70-60	1,398	May - October	Suwon (1985)
	Loam				
	Clay loam				
Soybean	Sandy loam	40-70-60	1,363	May - October	Suwon (1999)
	Loam				
	Clay loam				
Chinese cabbage (spring, fall)	Sandy loam	110-780-110	1,363	May - October	Suwon (1999)
	Loam			(Spring : May - June,	
	Clay loam			Fall : September - October)	

*This study was performed at the lysimeters located in national institute of agricultural science, RDA.

산/질화 분할 계수 (p72)는 기본값을 적용하였고, 토양 수리적 그룹은 USDA NRCS의 기준에 따라 적용하였다. 모델에 적용한 라이시미터 토양의 이화학적 특성은 Table 2에 제시하였다.

질산태 질소 용탈량 예측을 위해 APEX 모델을 활용할 수 있는지 검정하기 위하여 수원에 위치한 국립농업과학원 라이시미터에서 1985년과 1999년 작물 재배기간 중 질산태 질소 총 용탈량을 실측한 값과 모형 예측값을 비교하였으며, 재배관리 사항은 Table 3에 제시하였다.

APEX 모델에 재배 작물, 기상 조건을 달리 했을 때 질산태 질소 용탈량 차이가 있는지 확인하기 위하여 모델 보정에 이용한 라이시미터 토양에 대하여 1986년부터 2015년까지 30년간 기상자료를 적용하였다. 콩 (6 - 10월)과 가을 배추 (9 - 10월)에 대하여 예측하였으며, 재배기간 동안 30년간 총 강우량 범위는 각각 471 - 1,516 mm, 48 - 620 mm 이었다. 지하 투수량과 복귀류의 비율 (RFP0)은 기본값인 0.51을 적용하였고, 콩과 배추의 질소 비료사용량은 각각 43 kg ha⁻¹과 215 kg ha⁻¹으로 적용하였다.

통계분석 일 질산태 질소 용탈량에 대한 실측 값과 APEX 모형 예측값에 대한 평균제곱근오차 (RMSE)는 SAS 통계프로그램 (Ver.9.4, SAS Institute Inc., USA)을 이용하였다.

Results and Discussion

질산태 질소 용탈량 예측을 위한 보정 및 검정 라이시미터에서 2016년 7월 초 강우에 의해 질산태 질소 용탈이 일어났을 때와 매개변수 보정 전 모형 예측 값을 비교했을 때 동일한 시기에 질산태 질소 용탈이 일어난 것으로 모의하였다 (Fig. 1). 그러나 일별 질산태 질소 용탈량 차이가 실측값보다 적게 예측했기 때문에 질산태 질소 용탈량을 조절하는 매개변수의 보정이 필요하였다. 우선 수분의 수평이동을 제한하고 수직 침투가 일어나도록 매개변수를 조정하고, 작물 재배기간 동안 누적 질산태 질소 용탈량이 실측값과 유사하도록 질산태 질소 용탈량과 관련된 질소 이동 분할 매개변수를 조정하였다. 평균 일 질산태 질소 용탈량 (n = 148)의 평균 실측값은 0.34 kg ha⁻¹ d⁻¹, 보정된 모형 예측값이 0.37 kg ha⁻¹ d⁻¹ 이었고, RMSE는 0.484 kg ha⁻¹ d⁻¹ 이었다. 라이시미터는 실제 농경지와 달리 주변 토양과 격리되어 있는 조건이므로 지하배수와 함께 질산태 질소 용탈량이 급격히 증가하였다가 감소하는 양상을 보였고, 모델

예측 값은 질산태 질소 용탈량이 서서히 감소하는 양상을 보여 일 질산태 질소 용탈량의 결정계수 (R^2)는 0.575로 높지는 않았으나, 해당 기간 중 누적 질산태 질소 용탈량은 실측값의 약 1.08배로 근사하였다.

보정된 모델을 토양특성이 다른 라이시미터에도 적용할 수 있는지 확인하기 위하여 모델 예측 값과 실측 값을 비교한 결과, 모델 예측 값이 실측 값의 0.9275배 ($r^2 = 0.94$)로 거의 유사하게 예측하는 것으로 나타나 작물 재배기간 동안 총 질산태 질소 용탈량 예측에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다 (Fig. 2).

라이시미터에서 콩, 배추 재배에 따른 질산태 질소 용탈 예측 모델 보정에 이용한 라이시미터 토양에서 30년간 기상 조건에 따른 콩과 가을배추 재배기간 동안 강우에 의한 질산태 질소 용탈량을 예측한 결과 각각 $0 - 4 \text{ kg ha}^{-1}$,

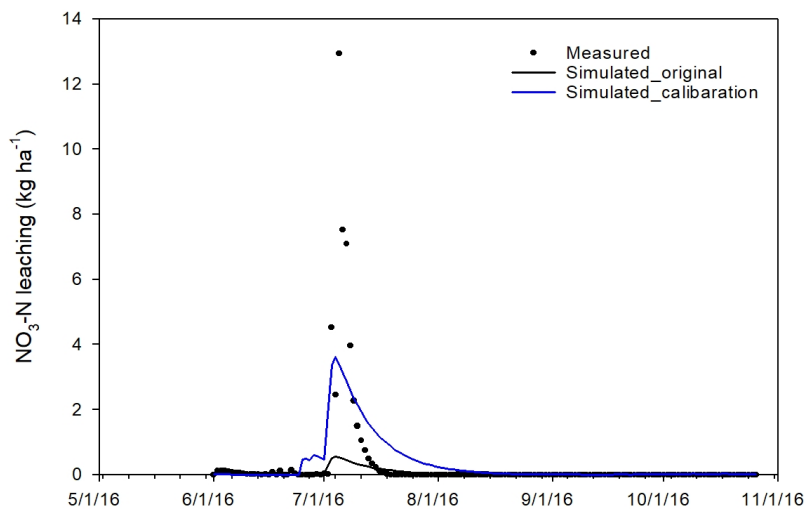


Fig. 1. Measured daily $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching and simulated results those were non-calibrated (original, black line) and calibrated models (blue line).

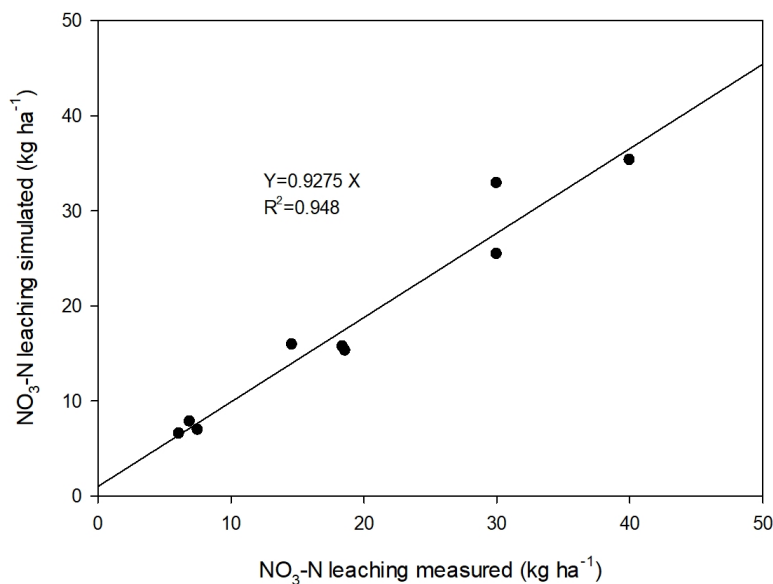


Fig. 2. Relations between simulated and measured values of cumulative $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching during cropping period by APEX model.

3.8 - 11.6 kg ha⁻¹ 이었다 (Fig. 3, 4). 라이시미터에서 콩을 재배했던 2015년에는 강우량이 급격히 감소하여 질산태 질소 용탈량 분석이 어려웠고, 2016년에는 폭우로 인해 지난 30년간 예측 값과 직접적인 비교는 어려웠다. 2017, 2018년 평년 강우량보다 적었던 배추 재배기간 중 질산태 질소 용탈량은 평균 4 kg ha⁻¹로 30년간 질산태 질소 용탈량의 최저 범위에 속하였다.

콩과 배추에 대하여 30년간 강우량과 질산태 질소 용탈량을 비교했을 때 대체로 강우량과 비례하여 질산태 질소 용탈량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 작물 간 비교했을 때 지하 배수량은 배추 재배기간 보다 강우량이 많았던 콩 재배기간 동안 많은 것으로 모의되었으나, 지하 배수의 질산태 질소 농도는 질소 비료량에 반응하여 배추 재배기간 동안 질산태 질소 용탈량이 많게 예측되었다.

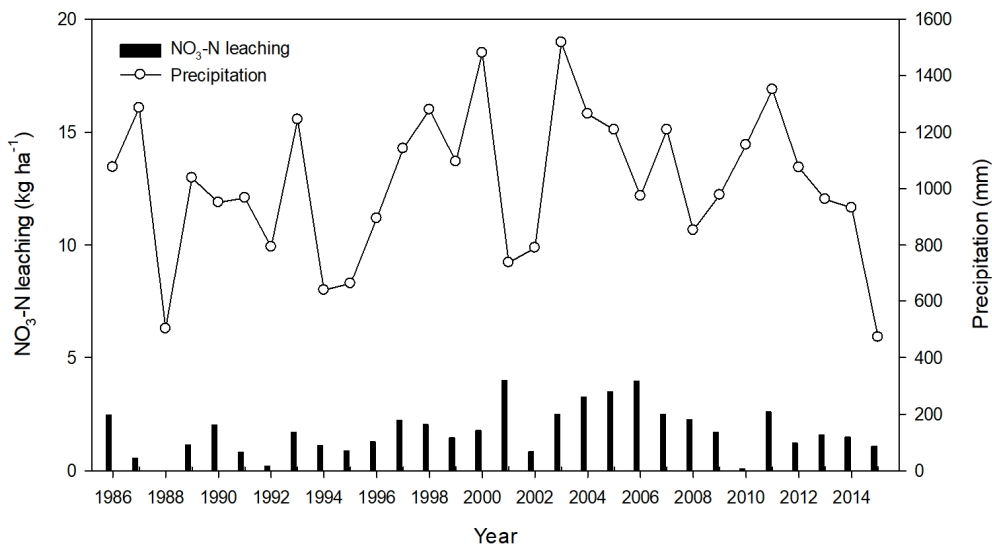


Fig. 3. Simulated NO₃-N leaching by APEX model and precipitation during cropping season of soybean from 1986 to 2015 in the lysimeter.

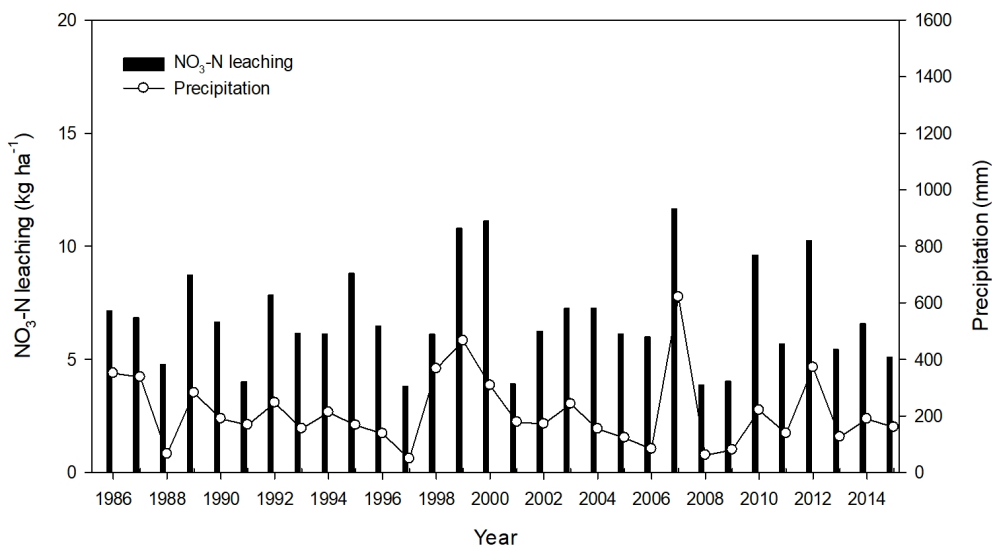


Fig. 4. Simulated NO₃-N leaching by APEX model and precipitation during cropping season of Chinese cabbage (fall) from 1986 to 2015 in the lysimeter.

Goulding et al. (2000)은 영국 로담스테드 장기연용 포장시험을 통해 질소 비료량도 질산태 질소 용탈량에 영향을 미쳤으나 특히 강우량이 주요한 요인이라고 하였다. Jaynes et al. (2001)은 미국 아이오와 주에서 옥수수과 콩 재배기간 중 질산태 질소 용탈량은 각각 37 - 61 kg ha⁻¹와 13 - 26 kg ha⁻¹로 질소 비료량이 많은 작물에서 질소 지하 용탈이 많았다고 하였다. 모델 또한 같은 토양 조건이라도 강우량과 질소 비료량에 따라 질산태 질소 용탈량을 다르게 예측하여 다양한 기상 조건과 질소 비료량에 따른 질산태 질소 예측에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

Conclusions

본 연구를 통해 APEX 모델을 활용하여 작물 재배기간 동안 총 질산태 질소 용탈량 예측이 가능한 것을 확인하였다. 질산태 질소 용탈은 현장 실측이 어렵기 때문에 농경지 질소 유출관리를 위한 대안으로 모델 활용이 유용할 것으로 판단된다. 그러나 모델의 확장성을 위해서는 우리나라 토양 유형에 따른 물리성 데이터 구축이 필요하고, 토양 물리성에 따른 물 이동특성, 질산태 질소 흡탈착능에 대한 보정이 필요하다. 또한 작물 재배에 따른 질산태 질소 용탈을 예측하는 모델이므로 다양한 작물계수가 필요하다. 작물계수는 작물의 질소 흡수, 수분이동과 관련된 증발산량 예측에 활용되기 때문에 표준화된 계수 개발을 위한 작물 생육 데이터 구축이 필요하다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ014262042019)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Akhavan, S., J. Abedi-Koupai, S.F. Mousavi, M. Afyuni, S.S. Eslamian, and K.C. Abbaspour. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan. Bahar Watershed, Iran. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139(4):675-688.
- Goulding, K.W.T., P.R. Poulton, C.P. Webster, and M.T. Howe. 2000. Nitrate leaching from the Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather. *Soil Use Manage.* 16(4):244-250.
- Groenendijk, P., M. Heinen, G. Klammler, J. Fank, H. Kupfersberger, V. Pisinaras, and A. Perego. 2014. Performance assessment of nitrate leaching models for highly vulnerable soils used in low-input farming based on lysimeter data. *Sci. Total Environ.* 499:463-480.
- Han, J., J. Shi, L. Zeng, J. Xu, and L. Wu. 2017. Impacts of continuous excessive fertilization on soil potential nitrification activity and nitrifying microbial community dynamics in greenhouse system. *J. Soils Sediments.* 17(2):471-480.
- Han, K.H. 2009. Contamination source assessment of groundwater nitrate in a complex terrain. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(1):14-20.
- Han, K.H., H.M. Ro, H.J. Cho, L.Y. Kim, S.W. Hwang, H.R. Cho, and K.C. Song. 2008. Mobility of nitrate and phosphate through small lysimeter with three physico-chemically different soils. 2008. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(4):260-266.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*

- 1(2):96-99.
- Jaynes, D.B., T.S. Colvin, D.L. Karlen, C.A. Cambardella, and D.W. Meek. 2001. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. *J. Environ. Qual.* 30(4):1305-1314.
- Kim, M.K., S.K. Choi, G.B. Jung, M.H. Kim, S.C. Hong, K.H. So, and J.H. Jeong. 2014. APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) model: An emerging tool for agricultural environmental analyses. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(3):187-190.
- Kim, S.H., H.Y. Hwang, M.S. Kim, S.J. Park, J.H. Shim, and Y.H. Lee. 2020. Assessment of fertilizer usage by food crops at the national level. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 53(2):231-236.
- Kim, Y.S., Y.H. Seo., D. Kraus, S. Klatt, E. Haas, J. Tenhunen, and R. Kiese. 2015. Estimation and mitigation of N₂O emission and nitrate leaching from intensive crop cultivation in the Haean catchment, South Korea. *Sci. Total Environ.* 529:40-53.
- Lee, K.S., Y.S. Bong, D. Lee, Y. Kim, and K. Kim. 2008. Tracing the sources of nitrate in the Han River watershed in Korea, using $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ values. *Sci. Total Environ.* 395(2-3):117-124.
- Lee, Y.J., J.H. Ok, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2018. Nitrate leaching and balance of soils grown with cabbage in weighing lysimeter. *Korean J. Environ. Agric.* 37(3):166-171.
- Li, Y., J. Li, L. Gao, and Y. Tian. 2018. Irrigation has more influence than fertilization on leaching water quality and the potential environmental risk in excessively fertilized vegetable soils. *PLOS ONE.* 13(9):e02045709.
- Ma, L., R.W. Malone, P. Heilman, D.L. Karlen, R.S. Kanwar, C.A. Cambardella, and L.R. Ahuja. 2007. RZWQM simulation of long-term crop production, water and nitrogen balances in Northeast Iowa. *Geoderma.* 140(3):247-259.
- Mencio, A., J. Mas-Pla, N. Otero, O. Regas, M. Boy-Roura, R. Puig, J. Bach, C. Domenech, M. Zamorano, D. Brusi, and A. Folch. 2016. Nitrate pollution of groundwater; All right..., but nothing else? *Sci. Total Environ.* 539:241-251.
- Park, H.R., M.K. Kim, and S.P. Hong. 2015. Characteristics of nitrate contamination of groundwater. *J. Environ. Impact Assess.* 24(1):87-98.
- Puntel, L.A., J.E. Sawyer, D.W. Barker, R. Dietzel, H. Poffenbarger, M.J. Casellano, and S.V. Archontoulis. 2016. Modeling long-term corn yield response to nitrogen rate and crop rotation. *Front. Plant Sci.* 7:1630.
- Roh, A.S., J.S. Park, Y.S. Park, O.J. Ju, M.W. Shin, M.K. Kim, and S.K. Choi. 2019. Evaluation of Changes in Agricultural Stream Water Quality of Small Watershed in Gyeonggi Province. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 52(4):369-374.
- Saxton, K.E. and W.J. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569-1578.
- Shaffer, M.J. and J.A. Delgado. 2002. Essentials of a national nitrate leaching index assessment tool. *J. Soil Water Conserv.* 57(6):327-335.
- Van der Velde, M., F. Bouraoui, and A. Aloe. 2009. Pan-European regional-scale modeling of water and efficiencies of rapeseed cultivation for biodiesel production. *Glob. Change Biol.* 15:24-37.
- Watanabe, M., S. Miura, S. Hasegawa, M.K. Koshikawa, T. Takamatsu, A. Kohzu, and S. Hayashi. 2018. Coniferous coverage as well as catchment steepness influences local stream nitrate concentrations within a nitrogen-saturated forest in central Japan. *Sci. Total Environ.* 636:539-546.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. The EPIC model and its application. In *Proc. ICRISAT-IBSNAT-SYSS Symp. International symposium on minimum data sets for agrotechnology transfer.* p. 111-121.
- Williams, J.R., R.C. Izaurralde, V.P. Singh, and D.K. Frevert. 2006. The APEX model. *Watershed models.* p.437-482. In: V. P. Singh and D. K. Frevert (ed.), CRC press, NY, USA.