

모형 기반의 농업분야 기후변화 취약성 평가 방법론 제안: APEX 모형과 회귀모형을 연계한 농경지 양분유출 평가를 중심으로

최순균*† · 이병모** · 정구복** · 전상민* · 어진우* · 이종문*** · 이준혁****

*국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구사, **국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구관,

국립농업과학원 기후변화평가과 박사후연구원, *(주)노트스퀘어 대표

Proposal of model-based methodologies for assessing climate change vulnerability in agriculture: Focusing on nutrient discharge assessment in agricultural land using a linked APEX and regression model

Choi, Soon-Kun*† · Lee, Byung-Mo** · Jung, Goo-Bok** · Jun, Sang-Min* · Eo, Jinu* · Lee, Jong-Mun*** and Lee, Junhyuk****

*Research Officer, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

**Senior Research Officer, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

***Postdoctoral Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

****Chief Executive Officer, Notesquare Inc., Seoul, Korea

ABSTRACT

Scientific, evidence-based vulnerability assessments are vital for predicting and mitigating the climate change risks poses to national systems. This study proposes a climate change vulnerability assessment method by combining a process-based model and machine learning, using nutrient runoff vulnerability in agricultural land as an example. A training dataset was generated using the process-based model APEX (Agricultural Policy and Environmental eXtender) to train a nonlinear regression machine learning model. The trained nonlinear regression model accurately replicated the APEX results, with an R^2 value of 0.53 for nitrogen in paddy, and 0.72 for nitrogen and 0.71 for phosphorus in upland. This model was then applied to quantify nitrogen and phosphorus discharge at the si (city) and gun (county) levels. The results for each indicator were normalized, and weights were assigned using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Vulnerability assessments were then conducted for mid-term (2041 ~ 2070) and long-term (2071 ~ 2100) future scenarios, and compared with the baseline period (1981 ~ 2010). The results showed that the average nutrient discharge vulnerability score for si and gun units was 31.4 in the baseline period, with a minimum of 0.6 and a maximum of 70.0. Under the SSP5-8.5 scenario, the average score increased to 43.6 in the mid-term future and 54.7 in the long-term future. However, when scenarios of compliance with standard fertilization rates for paddy and a 20% reduction in fertilization rates for upland were applied, the average score dropped to 33.3 in the mid-term future and 44.5 in the long-term future. These results highlight potential policy measures to mitigate the increasing vulnerability due to climate change in the agricultural sector and provide a rapid reference for policymakers when designing effective adaptation strategies.

Key words: SSP Scenario, Nitrogen, Phosphorus, Process-based Model, Machine Learning Model

†Corresponding author : soonkun@korea.kr (300 Nongsangmyeong-ro, Jeonju, Jeollabuk-do, 55365, Korea. Tel. +82-63-238-2504)

ORCID 최순균 0000-0003-3494-5371
이병모 0009-0000-0638-4365
정구복 0000-0002-7680-4131
전상민 0000-0002-1424-903X

어진우 0000-0003-3577-9942
이종문 0000-0003-1269-8277
이준혁 0009-0000-2563-3603

Received: September 21, 2024 / Revised: October 11, 2024 / Accepted: October 25, 2024

1. 서론

기후변화로 인한 지구온난화와 이상기상은 전 세계적으로 생태, 환경, 사회, 경제 등 전방위적인 문제를 야기하고 있으며 이러한 문제는 기후변화가 지속될수록 심화될 가능성이 있다(Carleton and Hsiang, 2016; Delpla et al., 2009; Grimm et al., 2013). 따라서 기후변화의 위험을 사전에 예측하고 대비하기 위한 과학적 근거 기반의 평가가 필요하다.

기후변화 취약성 평가는 특정 지역이나 시스템이 기후변화로 인해 받을 수 있는 잠재적 영향을 정량화하는 방법으로 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화 취약성 평가를 기반으로 적응 전략을 마련할 것을 권고하고 있다(IPCC, 2014). 취약성 평가 방법이 정형화되어있진 않지만, 대부분의 연구에서 어떤 시스템이 기후변화에 노출되었을 때의 민감도와 적응 능력을 평가하고 있으며 이러한 평가는 정책결정자가 제한된 자원 내에서 기후변화 적응 전략을 수립하는데 유용한 정보를 제공한다(Smit and Wandel, 2006). 환경부에서는 대리변수(Proxy variables)를 활용하여 지역별 기후자료, 통계자료 및 전문가 설문조사를 기반으로 하는 기후변화 취약성 평가 도구, VESTAP (Vulnerability Estimation Support Tool for Adaptation Planning)을 개발하여 지역별 기후 데이터를 기반으로 취약성을 평가하고 지자체의 적응 전략 수립을 지원하는 데 활용하고 있다(Oh et al., 2016).

한편, 이상적인 대리변수는 관측이 가능하고 평가하고자 하는 대상과의 상호작용이 명확해야 하나 주로 통계적 가용성이나 전문가의 의견에 따라 작위적으로 선택하는 문제가 있다(Kim et al., 2013). 따라서 대리변수를 활용한 방식은 과학적 근거가 명확하지 않으며 변수 간 독립성 확보와 결과의 검증이 어려워 기후변화가 평가대상에 미치는 복합적인 영향을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다(Giupponi et al., 2013). 이를 극복하기 위해 주성분 분석(PCA, Principal Component Analysis) 및 다변량 분석을 통해 변수를 선택하는 방법이 제시되었다. 이러한 통계 기법은 기후변화의 다양한 요인들을 분석하고, 상관관계가 높은 변수들을 도출하여 더욱 정교한 평가를 가능하게 한다(Cai et al., 2011; Zhang et al., 2022). 그러나 이러한 방법은 기후와 환경 요인이 평가대상에 미치는 물리적 영향을 직접적으로 평가하지 못하는 한계가 있다.

과정기반 모형(Process-Based Models)은 기후 및 환경

요인이 시스템에 미치는 물리적 영향을 정교하게 평가할 수 있는 도구이다. 이러한 모형은 평가대상과 변수들이 상호작용하는 방식을 물리적으로 모사하기 때문에 과학적으로 신뢰도 높은 결과를 제공한다(Bindi et al., 2015). 따라서 다양한 모형들이 농업, 환경 등에 관한 기후변화 영향평가, 기후변화 취약지역 도출 및 적응 기술 평가에 활용되었다(Bazrkar et al., 2023; Eitzinger et al., 2017; Nandan et al., 2021). 그러나 이러한 모형들은 국가, 지자체 단위의 공간적 분석에서 연산량이 감당할 수 없을 수준으로 증가하기 때문에 취약성 평가에 활용하기에 어려움이 있다.

기계학습(Machine Learning) 모형은 대규모 데이터를 빠르게 처리하고 복잡한 상호작용을 분석하는 데 유용하며 과정기반 모형과 비교해 관측 결과를 더욱 정확히 모의할 수 있다(Leng and Hall, 2020; Liakos et al., 2018). 따라서 기계학습 모형은 기후변화 취약성 평가에 있어 과정기반 모형의 대안이 될 수 있다. 그러나 기계학습 모형은 학습을 위한 충분한 데이터가 없을 때 나타나는 과적합(Overfitting) 문제, 기후변화와 같은 극한 기후조건에 대한 평가시 발생하는 외삽 오류(Extrapolation error), 이를 극복하기 위한 미래 기후 조건에서의 관측 데이터를 확보하기 어렵거나 불가능한 문제 등 한계가 있다(Bhouri et al., 2023; Liu et al., 2023; Sidhu et al., 2023).

따라서 본 연구는 기후변화 취약성 평가 방법으로 과정기반 모형과 기계학습 모형을 연계한 새로운 농경지 양분 유출 취약성 평가 방법론을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 SSP 시나리오의 활용, 과정기반 모형인 APEX (Agricultural Policy and Environmental eXtender) 모형을 활용한 학습데이터 생성, 기계학습 모형인 비선 회귀모형(non-linear regression model)을 활용한 과정기반 모형 학습, 평가 지표의 정규화 및 가중치 적용을 통한 시군 단위 농경지 양분유출 취약성 평가 결과 도출 과정에 관해 다루고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 기후변화 시나리오

본 연구에서는 기후변화 시나리오로서 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)를 통해 제공되는 SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오의 GCM (General Circulation Model)을 1 km 격자로

Table 1 Lists of General Circulation Models (GCMs) used in the study (Hur et al., 2023)

Name of GCMs	Modelling center (Nation)	Resolution (Pixels)
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	360×180
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (Japan)	320×160
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/Atmosphere and Ocean Research Institute/National Institute for Environmental Studies/RIKEN Center for Computational Science (Japan)	256×128
MIROC-ES2L		144×96
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Meteorologiques (France)	24572 grids distributed over 128 latitude circles
CNRM-ESM2-1		
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace (France)	144×143
MPI-ESM1-2-HR	Planck Institute for Meteorology (Germany)	384×192
MPI-ESM1-2-LR		192×96
UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre (UK)	192×144
ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (Australia)	192×144
ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)	192×145
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	128×64
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics (Russia)	180×120
INM-CM5-0		180×120
NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO (Norway)	144×96
KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences (South Korea)	288×144
EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	320×160

통계적 상세화한 자료를 사용하였다. 기후변화 시나리오는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 4종이며 6개 기후변수(최고·최저기온, 강수량, 일사량, 상대습도, 풍속) 자료가 2100년까지 모두 존재하는 18종의 GCM에 대하여 기후관측자료로부터 생산한 1 km 격자의 기후지도를 활용하여 Simple Quantile Mapping으로 편의보정한 자료(Hur et al., 2023)를 수집하였다. 사용된 GCM 목록은 Table 1과 같으며 해당 자료는 벼 기후생산력지수 변화 전망(Jo et al., 2023), 미래 극한가뭄 전망(Kim et al., 2024)에 사용되었다.

2.2. 과정기반 모형 및 기계학습 모형

2.2.1. APEX (Agricultural Policy and Environmental eXtender) 모형

본 연구에서는 논과 밭의 양분유출을 평가하기 위한 과정기반 모형으로써 APEX v1501 (2013년 11월 버전) 모

형을 사용하였다. APEX 모형은 농장 및 소유역 규모의 농업지역에 대하여 농업 활동이 토양 및 물 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 개발된 모형이다. APEX 모형은 지형, 토양, 기후, 작물 생육 및 작물 간 경합 등의 요소를 고려하여 경운, 비료 사용량, 관개, 작물선택 및 윤작, 최적관리기법(BMPs: Best Management Practices) 등 농장의 관리전략을 수립하고 환경영향을 평가하는 데 사용할 수 있다(Gassman et al., 2010).

한편, 초기 APEX v1501 (2015년 1월 버전)에는 APEX 모형에 논 재배환경을 모의하는 기능이 탑재되지 않았으나 국립농업과학원과 Texas A&M AgriLife Research가 공동으로 개발한 논 재배환경 모의 기능(Choi et al., 2017)을 2019년 1월 버전부터 사용할 수 있게 되었다. APEX 모형에서 논둑을 설치하도록 설정하면 유출 방정식이 SCS-CN 법(Kent, 1972)에서 물 수지에 의한 유출로 전환되며 논 답수에 따른 물 층의 형성, 물 층에 의한 토양침식 억제, 물꼬 높이 설정에 따른 빗물의 저장 및 이용, 낙수에 따른

배수 등을 모의할 수 있다(Choi et al., 2017).

본 연구에서는 선행연구에서 시험포장 관측 데이터를 기반으로 보정한 모형을 사용하였다. 논 질소 유출에 대하여 이천, 김제 지역 논에서의 관측자료를 기반으로 검정한 모형(Choi et al., 2017)을 사용하였으며 밭의 질소 및 인 유출에 대하여 완주 국립농업과학원 경사 밭(13%) 옥수수-가을배추 재배 시험포장에서 관측자료를 기반으로 검정한 모형(Lee et al., 2024)을 사용하였다. Choi et al. (2017)의 연구에서 논 질소 유출에 대하여 APEX 모형의 성능은 Moriasi et al. (2015)의 모형성능 기준에 따라 Satisfactory ~ Very good 수준으로 평가되었다. Lee et al. (2024)의 연구에서 APEX 모형은 밭 질소 및 인 유출에 대하여 Satisfactory ~ Good의 성능으로 평가되었다.

2.2.2. 기계학습 모형

본 연구에서는 기계학습 모형으로서 지도학습법 중 하나인 비선형 회귀 모형을 적용하였다. 학습에 사용된 자료는 APEX 모형을 활용하여 기후변화 시나리오, 경사도, 비료 사용량 입력값을 통해 도출된 결괏값을 기반으로 구성되었다. 기후변화 시나리오는 전주 종관기상관측소 지점에 대한 1981년도 ~ 2100년도의 자료를 사용하였으며 입력값 중 경사도 범위는 0 ~ 45%이며 논 질소 투입량의

범위는 0 ~ 300 kg/ha, 밭 질소 투입량의 범위는 0 ~ 600 kg/ha, 인 투입량의 범위는 0 ~ 300 kg/ha였다. 입력 변수와 결과 변수 간의 비선형적 관계가 있음을 확인하였기에 선형 회귀 모형 대신 비선형 회귀 모형, 특히 다항 회귀 방법을 채택하였다.

2.3. 기후변화에 따른 농경지 양분유출 취약성평가 방법

2.3.1. 농경지 양분유출 지표별 가중치 산정

환경부의 비점오염 원단위에서는 농경지를 크게 논, 밭으로 구분하고 있으며 농경지에서 강우에 의해 유출되는 비점오염원 중 양분은 총질소(T-N, Total Nitrogen), 총인(T-P, Total Phosphorus)으로 구분된다. 이 중 기후변화에 따른 영향을 예측하고 적응대책을 수립하기 위하여 관리의 우선순위 측면에서 가중치를 적용할 필요가 있다.

또한 단위면적당 부하량과 지자체 총 부하량 사이에도 가중치 산정이 필요하다. 어떤 시군은 농경지가 급경사지에 위치하거나 양분 투입량이 많아 단위면적당 양분유출에는 취약할 수 있으나 다른 시군에 비해 농경지 면적이 작아 관리해야 할 양분의 총 부하량은 적을 수 있기 때문이다.

따라서 위 내용을 종합하여 2021년도에 AHP (Analytic Hierarchy Process) 설문조사를 의뢰하였다. Fig. 1과 같이

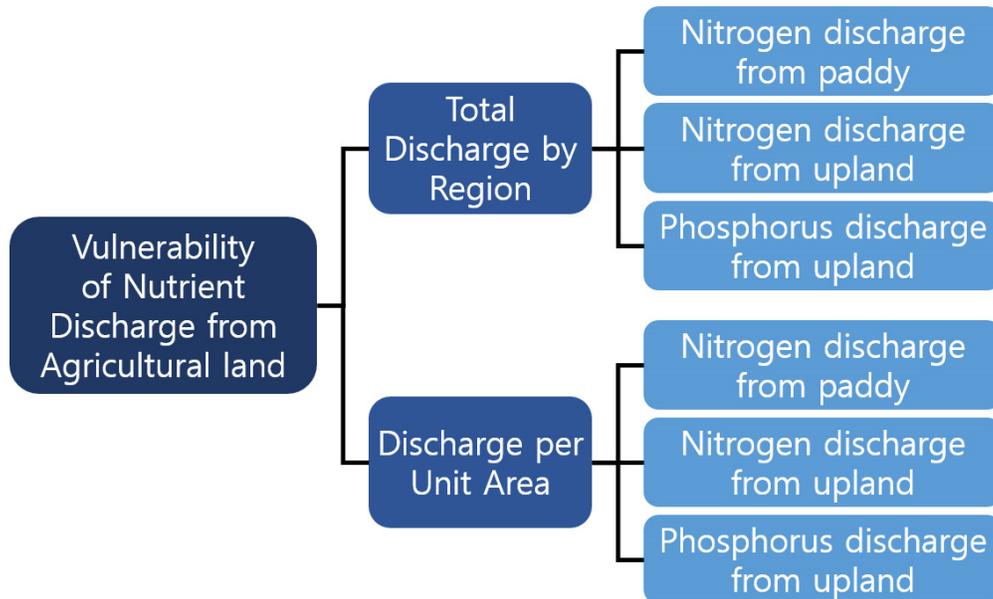


Fig. 1. AHP sturcture for survey on indicator weighting. In 2021, a survey was conducted among 30 experts related to the keywords climate change, agricultural water, and non-point source pollution from institutions and academia

가중치 산정을 위한 지표별 계층구조(hierarchy)를 구성하였으며 농업용수, 비점오염, 기후변화 키워드와 관련 있는 기관 및 학계 전문가 30인에게 평가를 의뢰하였다. 설문 제목은 ‘농경지 양분유출 기후변화 취약성 지표별 가중치 산정을 위한 설문’이며 설문 사전 설명자료에는 농경지 양분유출 취약성 평가의 필요성과 목적, 지표에 관한 설명과 선정이유, AHP 설문조사의 방법을 포함하였다.

2.3.2. 농경지 양분유출 지표 정규화

농경지로부터 유출되는 질소, 인의 양은 단위는 같으나 값의 범위가 큰 차이를 보인다. 이를 그대로 적용하면 어느 한 지표가 과 대표 될 우려가 있다. 따라서 각 지표는 0~100 사이의 값으로 식 (1)과 같이 정규화하였다.

$$VS_i = \frac{V_i - V_{i,\min}}{V_{i,\max} - V_{i,\min}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, VS_i 는 해당 지표의 취약성 점수, V_i 는 해당 지체의 양분유출 지표 값, $V_{i,\min}$ 은 지표의 최솟값, $V_{i,\max}$ 는 지표의 최댓값이다.

2.3.3. 시군단위 농경지 양분유출 취약성 평가

취약성 평가의 시간적 범위는 SSP 시나리오의 과거 재현 기간(1850~2014)과 미래 예측 기간(2015~2100) 고려하여 기준년도(historical, 1981~2010년), 근 미래 (short-term,

2011~2040년), 중간 미래(mid-term, 2041~2070년), 먼 미래(long-term, 2071~2100년)로 설정하였다. 각 기간별, 지자체별 취약성 평가 결과는 취약성 점수에 가중치를 부여하여 다음과 같이 산정하였다.

$$Vulnerability = \sum_i^n VS_i \times W_i \quad (2)$$

여기서, $Vulnerability$ 는 취약성, W_i 는 취약성 지수 i 의 가중치다.

시군단위 농경지 양분유출 취약성 평가를 위한 기초 자료로서 단위면적당 비료 사용량, 토지피복, 지형(경사도) 자료를 구축하였다. 비료 사용량 자료는 국립농업과학원에서 도 단위로 조사한 비료 사용 실태조사 자료(NAS, 2021)의 평균값을 사용하였다(Table 2). 농경지는 환경부에서 작성한 1:25000 중분류 토지피복도 (ME, 2018)로부터 30 m × 30 m 해상도로 추출하였다. 지형자료는 국토지리정보원에서 구축한 5 m 해상도의 DEM (Digital Elevation Model) (NGII, 2021)을 사용하였으며 QGIS v3.28.10를 이용하여 30 m × 30 m 해상도로 업스케일링 (upscaling) 후 경사도 지도를 작성하고 농경지별 경사도를 추출하였다.

시군 행정 경계는 국토교통부 시군구 경계도(MOLIT, 2023)를 기반으로 구를 시군단위로 통합하였다. QGIS v3.28.10으로 시군 경계도를 바탕으로 각 농경지(논/밭) 격자마다 속성을 부여하였다. 격자의 속성은 기후변화 시

Table 2. Fertilization rate per unit area by Do (province) based on fertilizer usage survey data (NAS, 2021) (total nitrogen and phosphorus content in chemical and organic fertilizers, Unit: kg/10a)

Province	Paddy		Upland	
	Nitrogen	Phosphorus	Nitrogen	Phosphorus
Gyeonggi-do	11.1	2.05	27.3	9.46
Gangwon-do	27.7	4.50	49.7	12.97
Chungcheongbuk-do	17.0	3.14	39.1	10.70
Chungcheongnam-do	14.5	2.23	46.0	17.00
Jeollabuk-do	11.8	3.10	57.0	20.25
Jeollanam-do	13.4	2.92	57.8	18.60
Gyeongsangbuk-do	12.6	2.05	46.8	12.50
Gyeongsangnam-do	15.2	4.54	47.8	17.16
Average	15.4	3.07	46.4	14.83

나리오 격자 번호, 도 코드, 시군 코드, 경사도였다. 생성된 자료로부터 취약성 평가를 위한 데이터를 추출하였으며 데이터의 용량을 줄이기 위해 같은 속성을 가진 자료를 묶고 해당 격자의 개수 값을 추가하였다. 따라서 최종 취약성 평가를 위한 데이터 속성은 기후변화 시나리오 격자번호, 도 코드, 시군 코드, 경사도, 격자개수로 구성하였다.

작성한 시군별 농경지 속성자료에 비선형 회귀 모델을 적용하여 단위면적 당 질소, 인 유출량을 산정하였으며 격자 개수를 이용하여 시군별 논/밭 양분유출 총량 값과 단위면적 당 유출량(면적 가중 평균 적용)을 산정하였다.

산정 결과는 시군 최댓값과 최솟값을 이용하여 정규화하였으며 지표별 가중치를 적용하여 산정된 양분유출 취약성 점수 결과를 지도로 표출하였다(Fig. 2).

3. 결과 및 고찰

3.1. 비선형 회귀 모형의 학습 결과 및 성능 평가

비선형 회귀 모형 학습 결과 논 질소 유출량, 밭 질소 및 인 유출량에 관하여 다음과 같은 회귀식이 도출됐다.

$$QN_{paddy} = 1.27 \Delta T_{mean} + 1.64 \times 10^{-2} PRCP + 1.72 \times 10^{-1} r20 + 1.66 FertN - 17.9 \tag{3a}$$

$$QN_{upland} = -2.26 \times 10^{-2} PRCP + 2.17 \times 10^{-5} PRCP^2 + 97.6 SLP - 60.4 SLP^2 + 4.72 \times 10^{-2} FertN - 9.81 \tag{3b}$$

$$QP_{upland} = -1.25 \times 10^{-2} PRCP + 9.89 \times 10^{-6} PRCP^2 + 24.4 SLP - 16.6 SLP^2 + 2.47 \times 10^{-1} FertP - 6.85 \tag{3c}$$

여기서, QN_{paddy} , QN_{upland} , QP_{upland} 는 각각 논 질소, 밭 질소, 밭 인 유출량(kg/ha)을, ΔT_{mean} 은 기준년도(1981~2010) 평년 기온 대비 연 평균 기온 차(°C), $PRCP$ 는 연 강수량(mm), $r20$ 은 20 mm 이상인 강우일수(day), SLP 는 농경지 경사도(%), $FertN$ 은 질소(N) 비료 사용량(kg/ha), $FertP$ 는 인(P) 비료 사용량(kg/ha)을 의미한다.

기후지표, 지형, 양분투입 수준을 활용한 비선형 회귀 모형이 APEX 모형을 재현하는 수준은 Fig. 3과 같다. 비

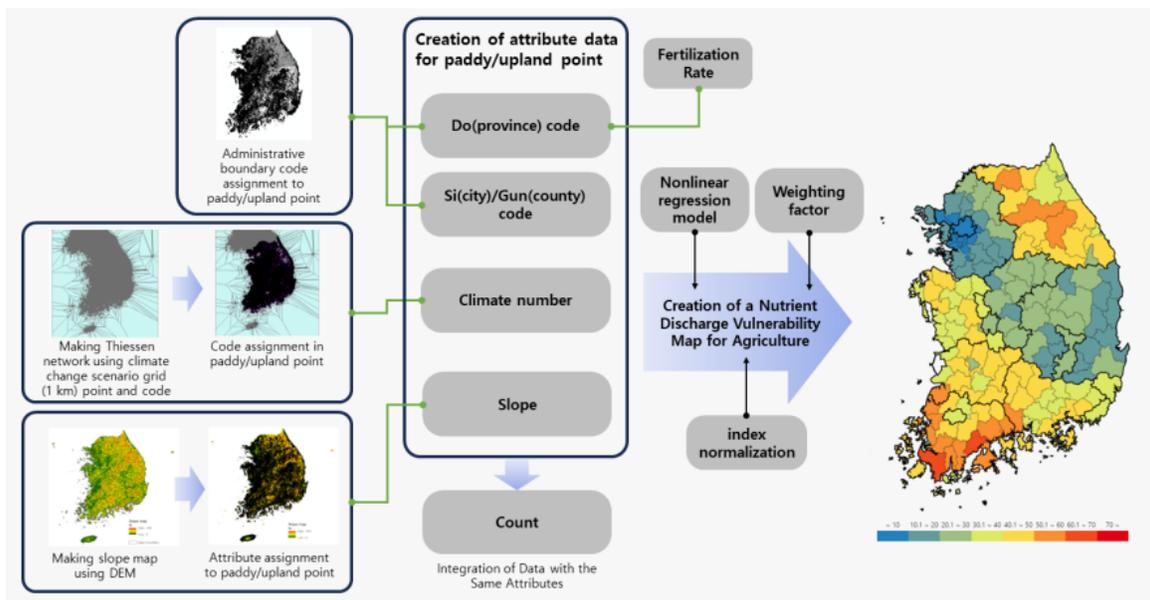


Fig. 2. Process for assessing nutrient discharge vulnerability in agriculture under climate change. Key variables include climate change scenarios, slope, and fertilization rates. Vulnerability scores for each si(city)/gun(county) were calculated using a nonlinear regression model and visualized through WebGIS.

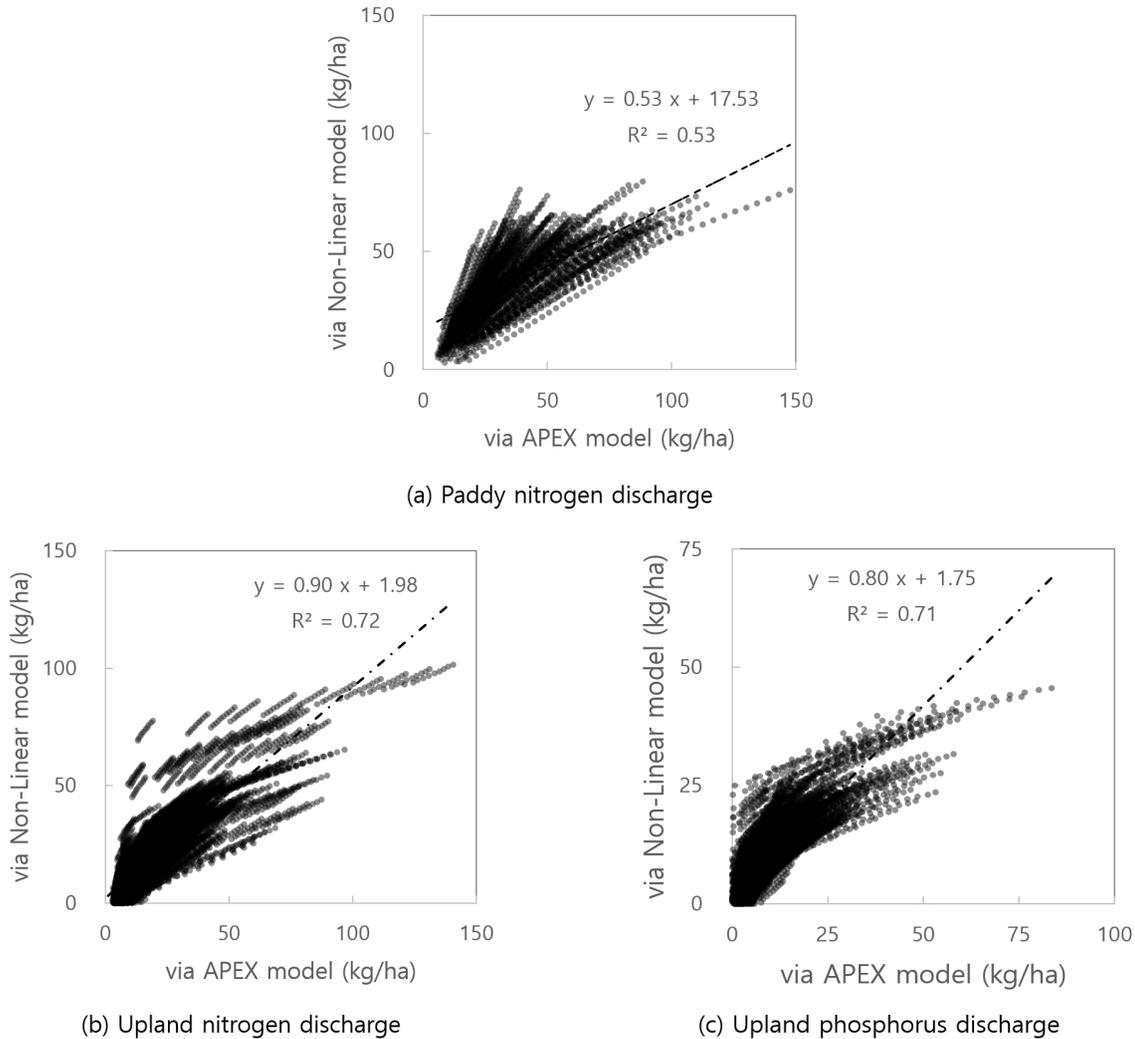


Fig. 3. Results of reproducibility evaluation of the APEX model using nonlinear regression model. The non-linear model explains (a) 53% of the variability in paddy nitrogen discharge, (b) 72% of the variability in upland nitrogen discharge, and (c) 71% of the variability in upland phosphorus discharge of the APEX model

선형 회귀 모형은 APEX 모형의 논·밭의 질소 유출에 관하여 분산의 53%를 설명할 수 있었으며 밭의 질소 유출은 72%, 밭의 인 유출은 71% 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 연 단위 기후지표를 사용하기 때문에 설명이 되지 않는 특이한 연도가 존재하지만 대체로 비선형 회귀 모형이 연 단위 기후지표만으로도 APEX 모형을 상당한 수준으로 재현하는 것으로 판단된다. 향후 더욱 다양한 기후지표, 월 단위 기후지표 등을 활용하고 다양한 기계학습 모형을 활용할 경우 재현성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 기후변화에 따른 농경지 양분유출 취약성평가 결과

3.2.1. 농경지 양분유출 지표별 가중치 산정 결과

1계층 가중치 부여 결과 단위면적당 유출량은 0.617, 시군 유출 총량은 0.383으로 단위면적당 유출량이 시군 유출 총량과 비교하여 농경지 양분유출 취약성 지수로서 기여도가 높은 것으로 나타났다. 2계층의 가중치 부여 결과 논 질소 유출량의 가중치는 0.337, 밭 질소 유출량의 가중치는 0.227, 밭 인 유출량의 가중치는 0.436으로 나타났으며 설문조사 일관성 평가지표인 CI (Consistency

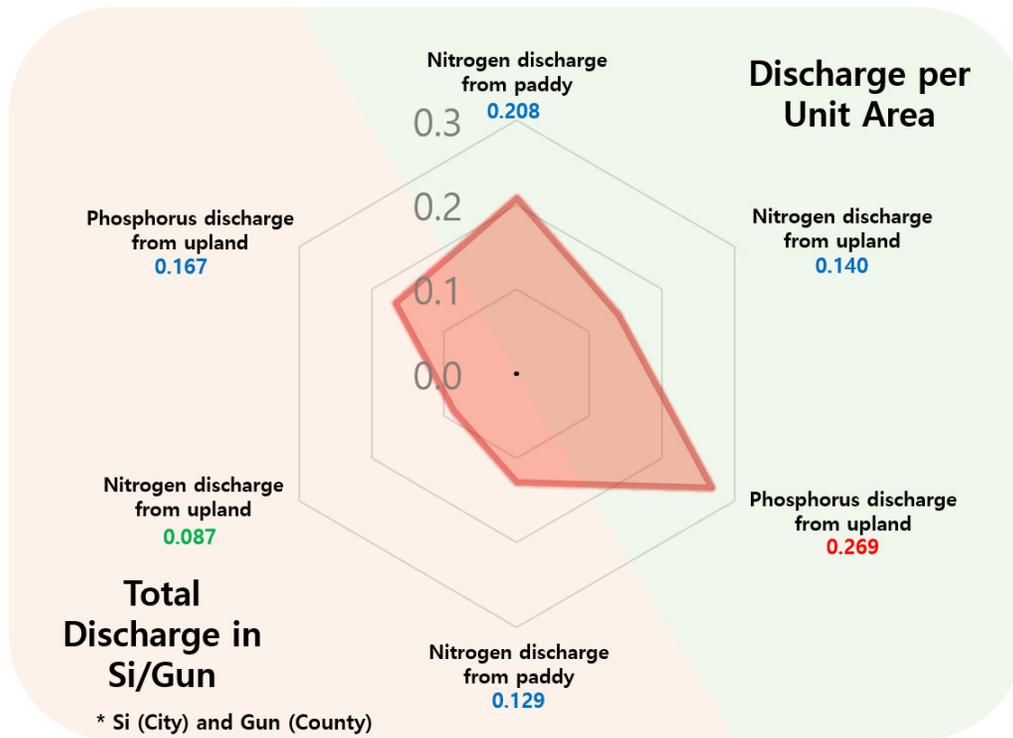


Fig. 4. AHP survey-based indicator weight calculation results. At Level 1, the discharge per unit area was 0.617, and the total si (city) / gun (county) discharge was 0.383. According to the weights at Level 2, phosphorus discharge per unit area in uplands had the highest weight 0.269

Table 3. Changes in nutrient discharge vulnerability scores for agricultural land under SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) climate change scenarios and the top and bottom 3 si (city) / gun (county) by score

Period	Historical (1981 ~ 2010)	Mid-term (2041 ~ 2070)				Long-term (2071 ~ 2100)			
Scenario	-	SSP1	SSP2	SSP3	SSP5	SSP1	SSP2	SSP3	SSP5
Average score	31.5	41.8	40.9	40.6	43.6	42.3	45.0	48.1	54.7
Maximum score	70.0	96.5	95.6	96.3	101.9	96.4	103.4	118.2	138.2
Minimum score	0.6	5.6	5.1	4.9	6.8	6.7	7.5	8.1	11.7
Top 3 si/gun	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam	Haenam
	Boseong	Gangjin	Gangjin	Gangjin	Gangjin	Gangjin	Gangjin	Gangjin	Gangjin
	Suncheon	Gwangyang	Gwangyang	Gwangyang	Gwangyang	Gwangyang	Boseong	Gwangyang	Gwangyang
Bottom 3 si/gun	Osan	Osan	Osan	Osan	Osan	Osan	Osan	Osan	Osan
	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon
	Guri	Guri	Guri	Guri	Guri	Guri	Guri	Guri	Guri

Index)의 평균값은 0.07로 응답의 일관성이 수용 가능한 수준으로 평가되었다.

1계층과 2계층을 종합한 결과, 농경지 양분유출 취약성 지수별 가중치는 단위면적당 밭 인 유출량의 가중치가 0.269로 가장 기여도가 높은 것으로 나타났고 시군 밭 질소 유출 총량의 가중치가 0.087로 가장 기여도가 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4). 그 외 기여도순으로 단위면적당 논 질소 유출량이 0.208, 시군 밭 인 유출 총량이 0.167, 단위면적당 밭 질소 유출량이 0.140, 시군 논 질소 유출 총량이 0.129의 가중치 값을 나타냈다.

3.2.2. 시군단위 농경지 양분유출 취약성 평가 결과

18개 GCM을 대상으로 농경지 양분유출 취약성 점수를 시군단위로 산정하고 그 결과의 양상별 평균값을 산정

하였다(Table 3). 그 결과 기준년도(1981~2010)의 시군 양분유출 취약성 점수는 평균 31.4, 최솟값 0.6, 최댓값 70.0 점으로 나타났다.

중간 미래(mid-term, 2041~2070)에 대해서는 SSP5-8.5 시나리오의 경우가 평균값 43.6점, 최솟값 6.8점, 최댓값 101.9 점으로 가장 큰 변동을 보였다. 한편, 전 세계가 협력하여 온실가스 감축 노력을 실현하고 지속 가능한 발전을 이루는 방향으로 나아가는 것을 전제로 하는 SSP1-2.6 시나리오가 오히려 SSP2-4.5 시나리오보다 농경지 양분유출 취약성이 더 증가하는 경향을 보였고 SSP2-4.5 시나리오 역시 SSP3-7.0 시나리오보다 취약성이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 기후변화 시나리오의 불확실성으로 인한 결과로 판단된다. 비선형 회귀모형에 따르면 농경지 양분유출량은 강수량의 영향을 크게 받는데 강수량은 연간

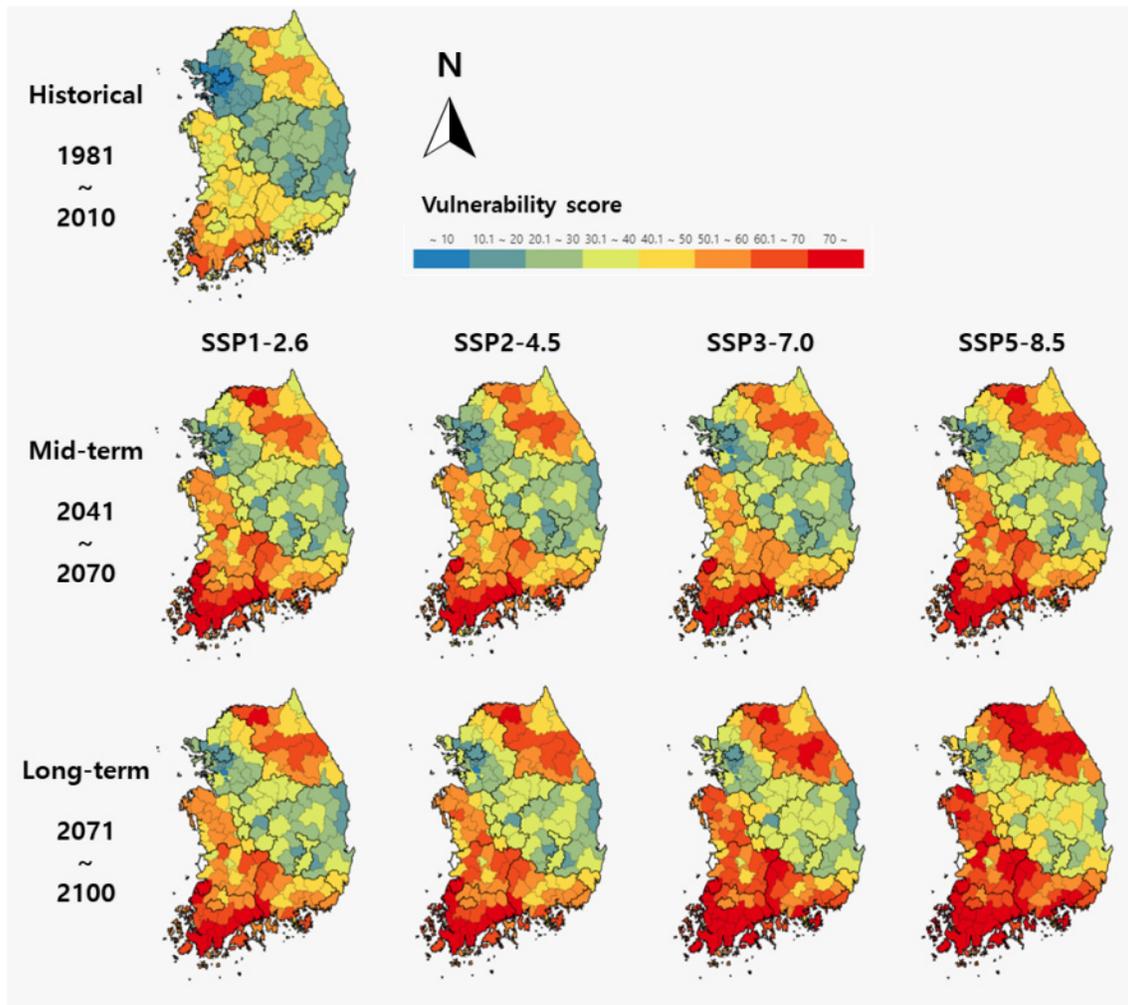


Fig. 5. Changes in nutrient discharge vulnerability scores for agricultural land under climate change

변동성이 매우 큰 지표이다. 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않는 가까운 미래에는 시나리오 간 불확실성으로 인해 예상과 달리(unexpected) SSP1-2.6, SSP2-4.5와 같은 저탄소 시나리오가 SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에 비해 강수량이 높은 것으로 예측될 수도 있기 때문이다 (Shin et al., 2021).

먼 미래(long-term, 2071 ~ 2100)에 대해서는 역시 SSP5-8.5 시나리오의 경우가 평균값 54.7점, 최솟값 11.7, 최댓값 138.2점으로 가장 크게 상승하였다. 먼 미래에는 예상대로 SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6 시나리오 순서로 농경지 양분유출 취약성 점수의 변동이 컸다.

농경지 양분유출 취약성이 큰 시군과 작은 시군을 살펴 보면, 큰 시군은 해남, 강진, 보성, 광양, 순천으로 주로 전

라남도에 지역에 위치하였으며 시나리오와 시기에 따라 2, 3위의 변동이 있었으나 해남은 항상 1위를 유지하였다. 이는 환경부 토지피복도 상의 해남 논 면적이 5위, 밭 면적이 1위를 차지하였으며 단위면적당 유출량은 높지 않았으나 해남군의 양분유출 총량은 논 질소 유출이 2위인 695 톤, 밭 질소 유출이 1위인 1115 톤, 인 유출 또한 1위인 1055 톤으로 산정되었기 때문이다.

농경지 양분유출 취약성이 작은 시군은 오산, 수원, 구리 순으로 나타났으며 기후변화에 따른 순위변동은 보이지 않았다. 이는 해당 시군의 농경지 면적이 각각 159위, 148위, 145위로 적어 시군 양분유출 총량이 작았으며 경기도의 적은 비료 사용량, 해당 시군 밭의 낮은 경사도로 인해 단위면적당 양분 유출량 또한 작게 평가되었기 때문

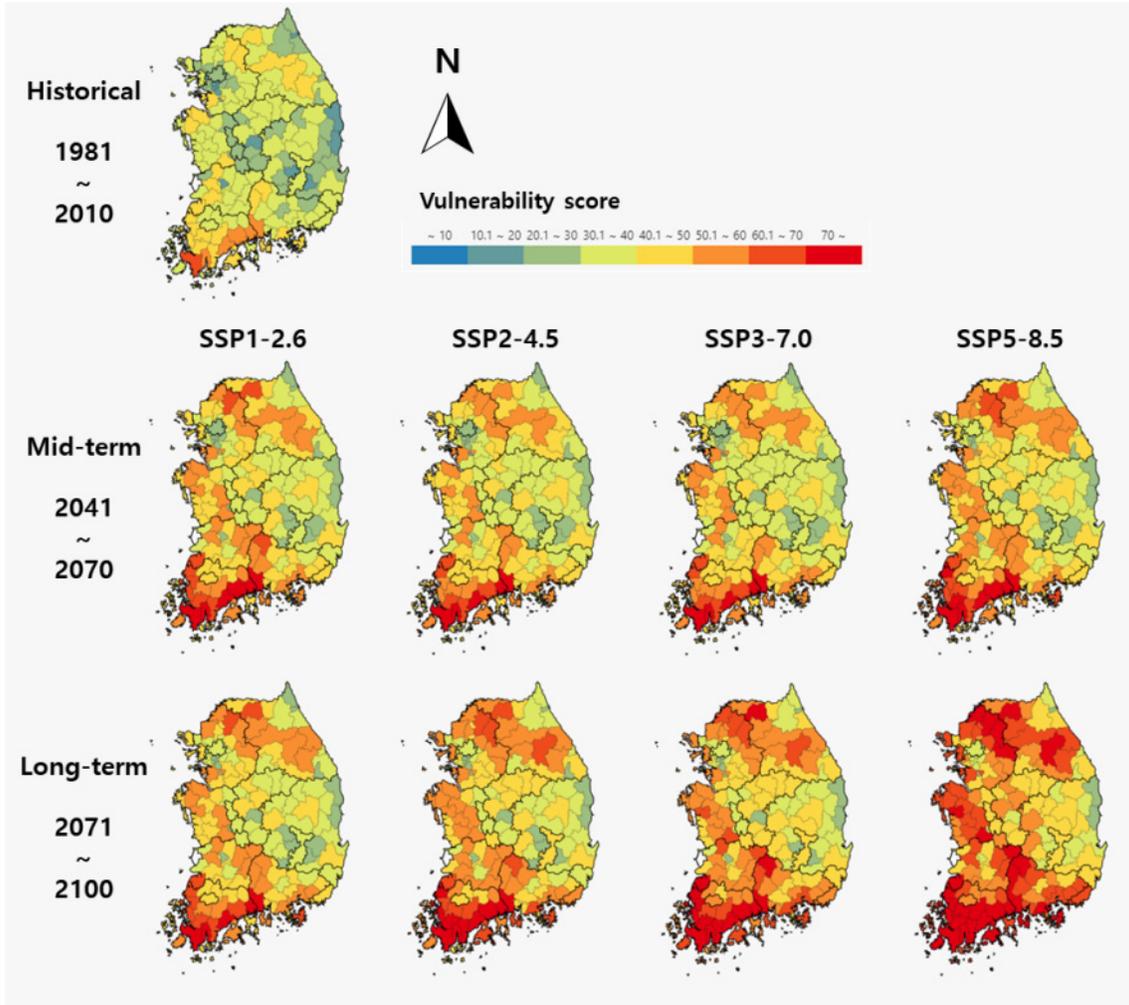


Fig. 6. Changes in nutrient discharge vulnerability scores for agricultural land under climate change, applying the national average nutrient input

인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 기후변화에 따른 농경지 양분유출 취약성 점수의 시군별 변화를 보여준다. 강수량이 적은 경상북도 지역과 농경지가 적고 양분 투입량이 상대적으로 낮은 경기도 및 충청북도 지역에서는 대체로 취약성 점수가 낮았다. 반면, 강원도 지역은 비료 사용량 실태조사(Table 2)에서 기록된 논 질소비료 사용량 수치가 매우 높아(277 kg/ha) 취약성 점수가 모든 시군에서 높은 값을 나타냈다.

한편, 지역별 비료 사용량에 관한 실태조사 자료는 도 단위 약 40개 농경지에 대한 현장조사 자료로서(NAS, 2021) 전체 시군을 대표하기에는 부족할 수 있다. 만약 지역별 비료 사용량이 전국 평균값으로 동일하다고 가정할 경우는 Fig. 6과 같다. 지역별 비료 사용량을 논 질소

154.1 kg/ha, 밭 질소 464.4 kg/ha, 밭 인 148.3 kg/ha로 동일하게 설정할 경우 지역간 비료 사용량의 차이의 영향은 사라지고 기후, 농경지 경사도, 농경지 면적 특성만 나타난다. 이 경우 대체로 취약성이 낮은 경기도, 충청북도, 경상북도의 취약성 점수가 올라가고 과도하게 산정되었던 강원도 지역의 취약성 점수가 낮아져 전국적인 기후, 농경지 면적, 농경지 경사도의 특성을 잘 나타내게 되었다 (Fig. 6).

직접적인 비교는 어렵지만, 밭에서의 양분 유출은 토양 침식과 높은 상관관계를 가지므로, 환경부의 기후변화 취약성 평가 지원 도구(Vulnerability assessment tool To build climate change Adaptation Plan; VESTAP, Oh et al., 2016)를 사용한 Oh et al. (2012)의 토양침식 취약성

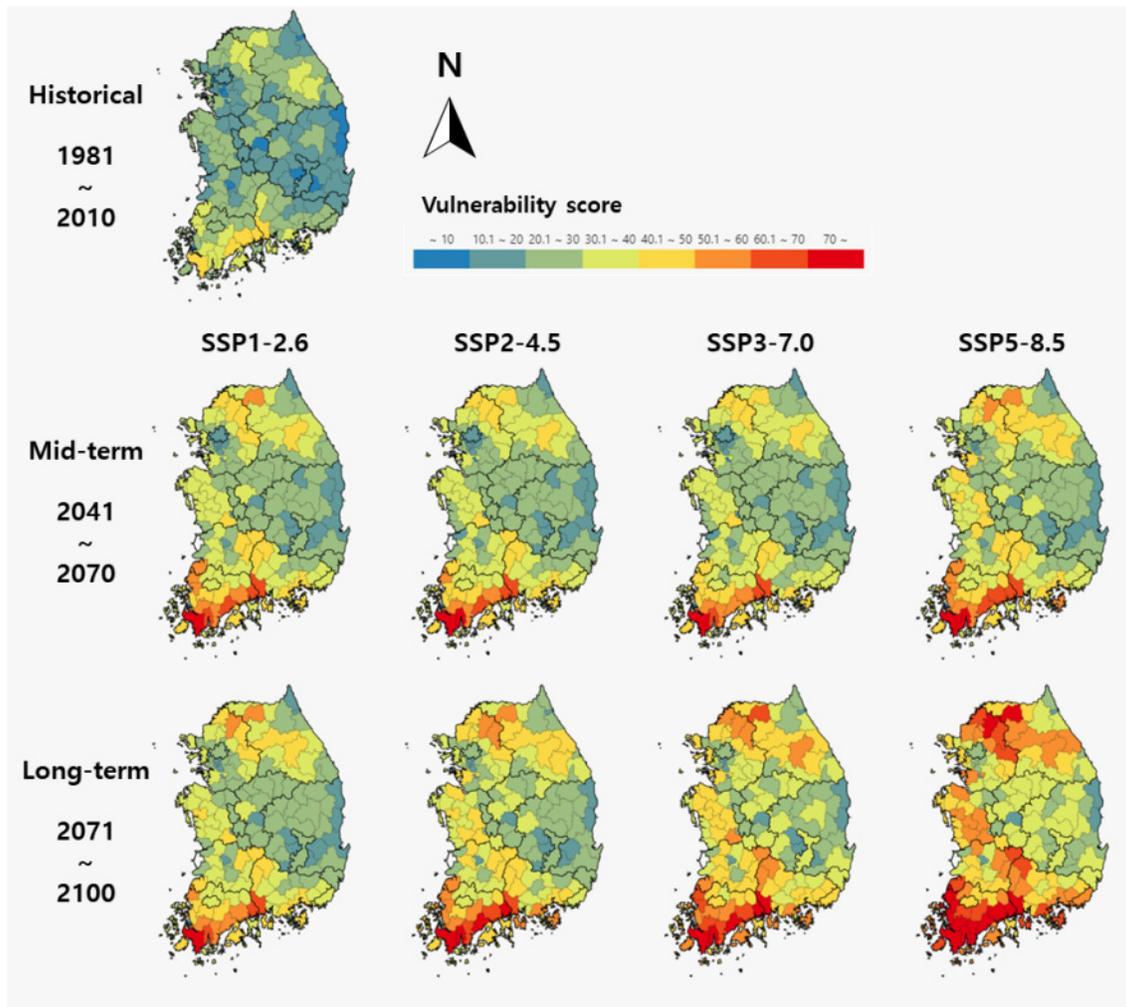


Fig. 7. Changes in nutrient discharge vulnerability scores for agricultural land under climate change, applying 110 kg/ha nitrogen to paddy fields and a 20% reduction in national average upland fertilization

연구와 비교할 때, 강우 강도가 높고 밭 경사도가 큰 영서 지방(화천군, 홍천군, 횡성군, 평창군)과 지리산 일대(구례군, 산청군, 하동군)의 취약성이 높게 나타나는 점에서 본 연구와 유사함을 확인하였다. 반면, 본 연구에서 평가한 농경지 양분 유출 취약성은 논외의 질소 유출을 포함하므로, 논이 많은 서해안(당진군, 서산시, 김제시, 부안군 등)과 남해안(해남군, 강진군, 보성군, 하동군 등) 지역의 취약성 점수가 높게 평가된다는 점에서 차이가 있었다.

기후변화로 인한 농경지 양분유출을 저감하기 위해, 벼의 표준 비료 사용량인 110 kg/ha를 준수하고, 밭 작물에 대해 질소와 인 비료 사용량을 각각 20% 줄여 371.5 kg/ha와 118.6 kg/ha를 적용하는 시나리오를 모의하였다(Fig. 7). 이러한 시나리오에서는 SSP5-8.5의 중간 미래의 경우 농경지 양분유출 취약성 점수 평균값 33.3점, 최솟값 9.4점, 최댓값 77.9 점으로 기준년대와 유사한 수준으로 관리 할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 7). SSP5-8.5 시나리오의 먼 미래에도 농경지 양분유출 취약성 점수 평균값 44.5 점, 최솟값 13.7점, 최댓값 118.5 점으로 SSP5-8.5 시나리오의 중간 미래 수준의 농경지 양분유출 취약성 점수를 유지하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이는 기후변화에 적응하기 위한 정책 방향을 설정하는 데 있어 중요한 참고 자료가 될 수 있음을 시사한다.

그러나 양분유출이 증가하는 상황에서 단순히 비료 사용량을 줄이는 방식은 농업 생산성에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 농경지 양분유출만을 고려한 기후변화 적응대책은 실효성이 떨어진다. 따라서, 단순 비료 사용량 감축 외에도 농경지에서의 양분 유출을 줄이기 위한 논 물 관리, 밭 멀칭(mulching), 효율적인 비료 투입 방법, 작부 체계의 변화 등 기후변화 적응을 위한 다양한 농경지 관리 방법이 함께 고려되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 기후변화 취약성 평가 방법으로 과정기반 모형과 기계학습 모형을 연계한 새로운 농경지 양분 유출 취약성 평가 방법론을 제안하였다. 이 방법은 기후적, 지형적 요인뿐만 아니라 양분 투입량과 같은 관리 요소를 종합적으로 고려하여 시·군 단위에서 농경지 양분 유출 취약성을 평가하는 체계다. 기존의 과학적 근거 기반 평가 방법이 대규모 연산 자원과 많은 시간이 소요되었던 것과 달리, 본 연구에서 제시한 방법은 사용자가 다양한 시나리오를 설정함에 따라 신속한 평가 결과를 제공할 수

있다는 점에서 의미가 있다.

본 연구의 취약성 평가 방법은 크게 두 가지 요소로 구성된다. 첫째, 과정기반 모형인 APEX 모형으로 학습용 데이터셋을 구성하고 기계학습 모형인 비선형 회귀 모형을 학습시킨다. 이를 통해 전국 단위로 APEX모형을 구동하는데 소요되는 시간을 획기적으로 줄일 수 있었다. 둘째, 기후변화 시나리오에 따른 시·군 단위 농경지 양분 유출 지표 값을 산정하고, 값을 0~100 사이의 값으로 정규화 한 후 가중치를 부여하여 취약성 점수를 도출한다. 결과적으로 본 연구의 취약성 평가 방법은 기온, 강수량, 경사도, 비료 사용량 등 다양한 변수를 종합적으로 고려하여 지역별 농경지의 특성에 맞는 취약성 점수를 빠른 속도로 산정할 수 있게 한다.

아울러 본 연구의 방법은 기후변화 적응 전략이 농경지 양분 유출 취약성을 얼마나 효과적으로 관리할 수 있는지 모의할 수 있다. 예를 들어, 벼 재배 시 표준 비료 사용량을 준수하고 밭 작물에 대한 질소 및 인 비료 사용량을 각각 20% 감축하는 시나리오에서, 미래 SSP5-8.5 시나리오 하에서도 과거 기준년도 수준의 농경지 양분 유출 취약성을 유지할 수 있음을 확인하였다. 이는 정책 수립 과정에서 기후변화 적응 전략의 효과를 사전에 검토할 수 있음을 시사한다.

기후변화에 따른 농경지 양분유출 취약성의 시군별 변화와 상대적 취약성을 한눈에 볼 수 있도록 웹사이트를 구축하였다(<https://farmdure.notesquare.co.kr/nutrient-vuln>). 해당 웹사이트에서는 기후변화 시나리오, 평가 기간, 기후변화 적응 방안 등을 선택하고, 시군별 농경지 양분유출 취약성을 웹GIS 상에서 확인할 수 있다. 사용자는 웹사이트에서 기후변화 시나리오, 평가 기간, 기후변화 적응 방안과 수준을 선택할 수 있다. 제한한 웹서비스는 사용자 선택에 따라 시군별 농경지 양분유출 취약성을 실시간으로 지도 형태로 생성하여 결과를 전송한다. 예를 들어, 사용자가 SSP5-8.5 시나리오와 기간을 선택하면 자동으로 해당 시나리오에 대한 시군별 농경지 양분유출 취약성 점수를 시각적으로 제공하고 농경지 양분유출 저감기술을 선택하거나 비료 사용량 수준을 조정하면 그 결과를 수초 내에 계산해 결과를 시각적으로 제공한다.

향후, 본 연구에서 제시한 취약성 평가 방법론과 웹서비스는 단순히 농경지 양분 유출 취약성뿐만 아니라 농업 생산성과 환경적 지속 가능성을 통합적으로 고려한 종합적인 취약성 평가로 확장할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 기후변화 대응을 위한 정책 결정 과정에서 과학적 근거

거를 기반으로 다각적인 평가를 가능하게 함으로써 기후 변화로 인한 농업 및 환경 문제에 더 실효성 있는 적응 전략을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 ‘기후 및 작부체계 변화에 따른 농경지 양분유출, 농업용수 수질 영향·취약성 평가 및 적응기술 개발’(RS-2024-00396736)의 지원에 의해 이루어진 것임

References

- Bazrkar MH, Danquah EO, Choi SK, Kim MK, Jeong J, Cho J. 2023. Projected unseasonable and shorter actual growth period for paddy rice and more pollutant loads into water bodies in a changing climate. *Agric Water Manag* 279: 108211. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108211
- Bhourri MA, Joly M, Yu R, Sarkar S, Perdikaris P. 2023. Scalable Bayesian optimization with randomized prior networks. *Comput Methods Appl Mech Eng* 417: 116428. doi: 10.1016/j.cma.2023.116428
- Bindi M, Palosuo T, Trnka M, Semenov M. 2015. Modelling climate change impacts on crop production for food security. *Clim Res* 65: 3-5. doi: 10.3354/CR01342
- Cai YP, Huang GH, Tan Q, Yang ZF. 2011. An integrated approach for climate-change impact analysis and adaptation planning under multi-level uncertainties. Part I: Methodology. *Renew Sustain Energy Rev* 15(6): 2779-2790. doi: 10.1016/j.rser.2011.03.013
- Carleton T, Hsiang S. 2016. Social and economic impacts of climate. *Science* 353(6304): aad9837. doi: 10.1126/science.aad9837
- Choi SK, Jeong J, Kim MK. 2017. Simulating the effects of agricultural management on water quality dynamics in rice paddies for sustainable rice production—Model development and validation. *Water* 9(11): 869. doi: 10.3390/w9110869
- Delpla I, Jung AV, Baures E, Clement M, Thomas O. 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environ Int* 35(8): 1225-1233. doi: 10.1016/j.envint.2009.07.001
- Eitzinger A, Läderach P, Rodriguez B, Fisher M, Beebe S, Sonder K, Schmidt A. 2017. Assessing high-impact spots of climate change: Spatial yield simulations with Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 22: 743-760. doi: 10.1007/s11027-015-9696-2
- Gassman PW, Williams JR, Wang X, Saleh A, Osei E, Hauck LM, Izaurrealde RC, Flowers JD. 2010. The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) Model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. *Trans ASABE* 53(3): 711-740. doi: 10.13031/2013.30078
- Giupponi C, Giove S, Giannini V. 2013. A dynamic assessment tool for exploring and communicating vulnerability to floods and climate change. *Environ Model Softw* 44: 136-147. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.05.004
- Grimm NB, Chapin FS III, Bierwagen B, Gonzalez P, Groffman PM, Luo Y, Melton F, Nadelhoffer K, Pairis A, Raymond PA, et al. 2013. The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Front Ecol Environ* 11(9): 474-482. doi: 10.1890/120282
- Hur JN, Cho JP, Shim KM, Jo SR, Kim YS, Kang MG, Oh CS, Seo SB, Kim ES. 2023. Production of digital climate maps with 1km resolution over Korean Peninsula using statistical downscaling model (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 25(4): 404-414. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.404
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Jo SR, Kim YS, Hur JN, Lee JL, Kim ES, Shim KM,

- Kang MG. 2023. Climatic yield potential changes under climate change over Korean peninsula using 1-km high resolution SSP-RCP scenarios (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 25(4): 284-301. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.284
- Kent KM. 1972. Chapter 15. Travel time, time of concentration and lag. In: USDA-SCS (ed). *National engineering handbook, Section 4: Hydrology, Revised edn.* Washington, DC: USDA-SCS.
- Kim S, Kim S, Kim S. 2013. A study on the vulnerability assessment for agricultural infrastructure using principal component analysis (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Agric Eng* 55(1): 31-38. doi: 10.5389/KSAE.2013.55.1.031
- Kim SH, Nam WH, Jeon MG, Hong EM, Oh C. 2024. Projected future extreme droughts based on CMIP6 GCMs under SSP scenarios (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Agric Eng* 66(4): 1-15. doi: 10.5389/KSAE.2024.66.4.001
- Lee JM, Yeob SJ, Jun SM, Lee B, Yang Y, Choi SK. 2024. Evaluation of non-point pollution loads in corn-autumn Kimchi cabbage cultivation areas by fertilizer application levels using the APEX model (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Agric Eng* 66(5): 15-27.
- Leng G, Hall JW. 2020. Predicting spatial and temporal variability in crop yields: An inter-comparison of machine learning, regression and process-based models. *Environ Res Lett* 15(4): 044027. doi: 10.1088/1748-9326/ab7b24
- Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. 2018. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors* 18(8): 2674. doi: 10.3390/s18082674
- Liu S, Lu D, Painter SL, Griffiths NA, Pierce EM. 2023. Uncertainty quantification of machine learning models to improve streamflow prediction under changing climate and environmental conditions. *Front Water* 5: 1150126. doi: 10.3389/frwa.2023.1150126
- ME (Ministry of Environment). 2018. Medium classification land cover map. [accessed 2023 Aug 15]. <https://egis.me.go.kr/req/intro.do>
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). 2023. (Census boundary) City, county, and district boundary. [accessed 2024 Aug 12]. https://www.vworld.kr/dtmk/dtmk_ntads_s002.do?dsId=30015
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans ASABE* 58(6): 1763-1785. doi: 10.13031/trans.58.10715
- Nandan R, Woo DK, Kumar P, Adinarayana J. 2021. Impact of irrigation scheduling methods on corn yield under climate change. *Agric Water Manag* 255: 106990. doi: 10.1016/J.AGWAT.2021.106990
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2021. Monitoring project on agri-environmental quality in Korea. Jeonju, Korea: Rural Development Administration. Research Report 2020-17.
- NGII (National Geographic Information Institute). 2021. Digital Elevation Model of South Korea. [accessed 2021 Aug 3]. <https://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do>
- Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of web-based supporting tool (VESTAP) for climate change vulnerability assessment in lower and municipal-level local governments (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 19(1): 1-11. doi: 10.11108/kagis.2016.19.1.001
- Oh YJ, Kim MH, Na YE, Hong SH, Paik WK, Yoon ST. 2012. Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaption (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 45(5): 711-716. doi: 10.7745/KJSSF.2012.45.5.711
- Shin Y, Shin Y, Hong J, Kim MK, Byun YH, Boo KO, Chung IU, Park DSR, Park JS. 2021. Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in the Korean peninsula from the CMIP6 ensemble with a statistical framework. *Atmosphere* 12(1): 97. doi: 10.3390/atmos12010097
- Sidhu B, Mehrabi Z, Ramankutty N, Kandlikar M. 2023. How can machine learning help in understanding the impact of climate change on crop yields? *Environ Res*

Lett 18(2): 024008. doi: 10.1088/1748-9326/acb164

Smit B, Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob Environ Change* 16(3): 282-292. doi: 10.1016/J.GLOENVCHA.2006.03.008

Zhang Y, Song T, Fan J, Man W, Liu M, Zhao Y, Zheng H, Liu Y, Li C, Song J, et al. 2022. Land use and climate change altered the ecological quality in the Luanhe River Basin. *Int J Environ Res Public Health* 19(13): 7719. doi: 10.3390/ijerph19137719