Korean Journal of Environmental Agriculture
Open Access
https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

Article
https://www.korseaj.org

왕겨 바이오차 연용시 배추 재배에서 온실가스 배출 및 토양 탄소 수지에 미치는 영향 평가

박도균[1,2], 김혜원[1], 이형석[1], 이민지[1], 박혜란[1], 오택근[2**], 이선일[1*]

Evaluation of the Impact of Continuous use of Rice Hull Biochar on Greenhouse Gas Emissions and Net Ecosystem Carbon Balance in Kimchi Cabbage Cultivation

Do-Gyun Park[1,2], Hye-Won Kim[1], Hyoung-Seok Lee[1], Min-Ji Lee[1], Hye-Ran Park[1], Taek-Keun Oh[2**] and Sun-Il Lee[1*]

[1]농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과, [2]충남대학교 농업생명과학대학 농화학과
[1]Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, [2]Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
* Correspondence: silee83@korea.kr; ** Co-correspondence: ok5382@cnu.ac.kr

Abstract: Biochar is increasingly recognized as a sustainable practice to enhance soil carbon balance and reduce greenhouse gas emissions. Produced through the pyrolysis of biomass in limited oxygen, biochar has shown promise in agriculture. However, its effects on the Net Ecosystem Carbon Balance (NECB), Total Global Warming Potential (GWP), and Net GWP, especially during autumn and spring Kimchi cabbage growing seasons, require further research. This study investigates the impact of rice hull biochar on NECB, CO_2, and N_2O emissions during these seasons. The Biochar application rates were control=0 ton/ha, B1=1 ton/ha, B3=3 ton/ha, and B5=5 ton/ha. In autumn, Total GWP, including CO_2 emissions, ranged from 3.55 to 3.93 t/ha, showing no significant impact from increased biochar application. However, Net GWP decreased substantially with higher biochar inputs, ranging from -6.84 t/ha in the control to -16.59 t/ha in the B5 treatment, indicating enhanced carbon sequestration. During spring, Total GWP increased slightly with more biochar, from 1.63 to 1.97 t/ha, but Net GWP consistently decreased, from -8.80 to –18.74 t/ha. These results suggest that while Total GWP varies seasonally, biochar improves NECB and reduces Net GWP, highlighting its potential for mitigating climate change through sustainable agricultural practices.

Keywords: Greenhouse gas emissions, Kimchi cabbage cultivation, Net ecosystem carbon balance, Rice hull biochar, Total GWP

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

Received: August 23, 2024
Revised: September 12, 2024
Accepted: September 23, 2024
Published: September 30, 2024

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Check for updates

ⓒ The Korean Society of Environmental Agriculture 2024

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

현대 농업은 스마트농업과 같은 첨단 기술의 발전에도 불구하고, 여전히 기후변화, 토양 황폐화, 영양소 고갈과 같은 심각한 문제에 직면해 있으며, 이는 농업 생산성과 식량안보를 위협하고 있다[1]. 특히, 지구온난화로 인한 온도 상승은 토양 내 유기물의 분해 속도를 가속화하고 염분 축적을 초래하여, 노지에서 재배되는 작물의 생산성을 감소시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 바이오차의 사용이 주목받고 있다[2-4]. 바이오차는 350°C의 높은 온도에서 바이오매스를 산소가 제한된 환경에서 열분해하여 얻은 탄소 함량이 높은 고형물이다[5]. 바이오차는 우수한 토양개량 효과를 지니고 있으며, 토양 구조와 비옥도를 개선하고 수분 보유력을 증대시킨다[6]. 따라서 작물 수확량을 증가시키고 토양 내 탄소를 격리하여 기후변화 완화에 기여하는 효과적인 방법으로 평가된다[7]. 바이오차는 넓은 표면적, 높은 전하 밀도, 안정된 다공성 구조로 되어있어, 특히 사질 토양에서 수분 보유력을 개선하는 데 효과적이다[8]. 추가로, 바이오차는 토양의 화학적 및 생물학적 특성, 특히 pH와 양이온 교환 용량(CEC)에 긍정적인 영향을 미쳐 토양의 비옥도와 기능성을 향상시킨다[9]. 농업기술의 발전과 함께 바이오차는 지속 가능한 농업부산물 관리와 환경 오염 문제에 대한 해결책으로 주목받고 있다. 또한 바이오차는 다양한 유기물(왕겨, 밀짚, 가축분뇨 등)로부터 제조할 수 있어, 여러 유기성 폐자원을 활용하는 효과적인 방안으로 보고되고 있다[10]. 농경지에서 배출되는 농업부산물인 왕겨를 이용한 바이오차는 농경지에서 자원순환 측면에서 지속 가능하고 경제적인 이점이 있다[11].

이산화탄소(Carbon Dioxide, CO_2) 배출 증가로 인한 지구온난화 현상이 심각해짐에 따라, 바이오차는 대기 중 탄소를 토양으로 저장하는 혁신적인 방법으로 주목받고 있다. 따라서 농경지 바이오차 적용은 지구온난화와 그에 따른 기후변화의 영향을 완화할 수 있는 유망한 전략으로 평가된다[12]. 바이오차는 CO_2뿐만 아니라 아산화질소(Nitrous Oxide, N_2O) 배출도 효과적으로 줄일 수 있다.

한국에서 재배되는 배추는 통계청에 따르면, 엽채류 재배 면적의 66%인 30,537ha가 배추 재배지이며, 배추는 전체 엽채류 생산량의 82%를 차지하고 1인당 연간 소비량은 약 37kg이다(통계청, 2022). 배추는 질소질 비료 투입이 많이 들어가는 한국에서 중요한 작물로 재배 면적과 생산량이 매우 크며, 이에 관한 연구는 농업적으로 실용성이 높다[13]. 많은 연구가 주로 가을배추 재배에 초점을 맞추고 있지만, 봄배추 재배는 기후 조건과 성장 환경이 다르므로 바이오차 처리가 미치는 영향이 다르게 나타날 수 있다[14]. 봄철은 온도 변동이 크고 강우량이 많아 배추 수확량에 큰 영향을 미친다[15]. 봄과 가을에 재배되는 배추는 수확량 조건이 매우 달라 수확량 특성과 수확량에도 차이가 발생한다[16]. 봄배추는 다양한 기상 조건에 노출되어 수확량과 품질에 영향을 받지만, 가을배추는 비교적 안정된 기후 조건에서 재배되므로 수확량이 상대적으로 일정하다[17]. 이러한 계절별 환경 특성을 반영하여, 본 연구는 가을, 봄배추 재배기간 동안 바이오차 연용 처리가 토양 탄소 수지와 온실가스 배출에 미치는 영향을 평가하고, 지속 가능한 농업 실현을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

시험 포장 및 기상 조건

본 연구는 전북특별자치도 완주군에 위치한 국립농업과학원 시험포장(35°49′45.5"N, 127°02′39.8"E)에서 수행되었다. 시험포장의 토양은 개간된 사양토로, 이화학적 특성은 토양산도(pH) 6.5, 총 탄소(T-C, Total Carbon) 3.73 g/kg, 총 질소(T-N, Total Nitrogen) 0.36 g/kg이었다. 실험은 난괴법 3반복으로 배치하였으며, 바이오차 투입량은 대조구(0 ton/ha), B1(1 ton/ha), B3(3 ton/ha), B5(5 ton/ha)로 설정하여 작물 재배 1주일 전 각각 투입하였다.

배추는 질소비료를 많이 필요로 하는 작물로, 실험은 2022년 가을과 2023년 봄 두 계절에 걸쳐 수행되었다. 가을과 봄 재배 동안 왕겨 바이오차와 비료는 같은 반복 처리구에 동일하게 적용되었다. 휴경기 동안 시험 포장은 제초 등의 기본 관리 작업을 통해 실험 조건을 유지하였으며, 이러한 관리 방법은 대조구와 바이오차 처리구 모두에 동일하게 적용하였다. 가을 실험에서는 '청고마비' 품종을, 봄 실험에서는 '진청' 품종을 사용하였다. 가을배추의 재배기간은 2022년 9월 13일부터 11월 23일까지였으며, 봄배추의 재배기간은 2023년 4월 7일부터 6월 12일까지였다. 재식거리는 이랑 간 75cm, 포기 간 45cm로 설정하였고, 비료 투입량은 농촌진흥청의 표준시비량 기준에 따라 N-P_2O_5-K_2O 32-7.8-19.8 kg/10a로 적용하였다. 웃거름은 정식 후 30일과 45일에 두 차례 나누어 투입하였다. 휴경 기간 동안 시험 포장에는 잡초 제거와 같은 기본적인 관리를 수행하였다.

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

가을배추 재배기간의 기상자료는 9월부터 11월까지 수집하였으며, Fig. 1과 같다. 9월 중순의 기온은 25.3°C로 지난 10년 평균인 평년보다 3.9°C 높았으나, 9월 하순부터 11월 초순까지는 평균보다 0.4°C에서 1.5°C 낮았다. 10월 초순에는 강수량이 42.0 mm에 달했다. 봄배추 재배기간의 기상자료는 4월부터 6월까지 수집하였으며, 재배기간 동안 평균 기온은 평년보다 다소 낮았고, 5월에는 집중호우가 발생했다. 4월 초순의 평균 기온은 9.1°C로 평년보다 1.6°C 낮았으나, 4월 중순에는 14.5°C로 평년보다 2.0°C 높았다. 이후 기온은 평년과 1°C 이하의 차이를 보였다. 5월 초순과 하순에는 각각 84.0 mm와 140.0 mm의 강수량이 기록되었으며, 이러한 기상 조건에 따라 토양의 온도와 수분함량 또한 변화가 있었다(Fig. 1).

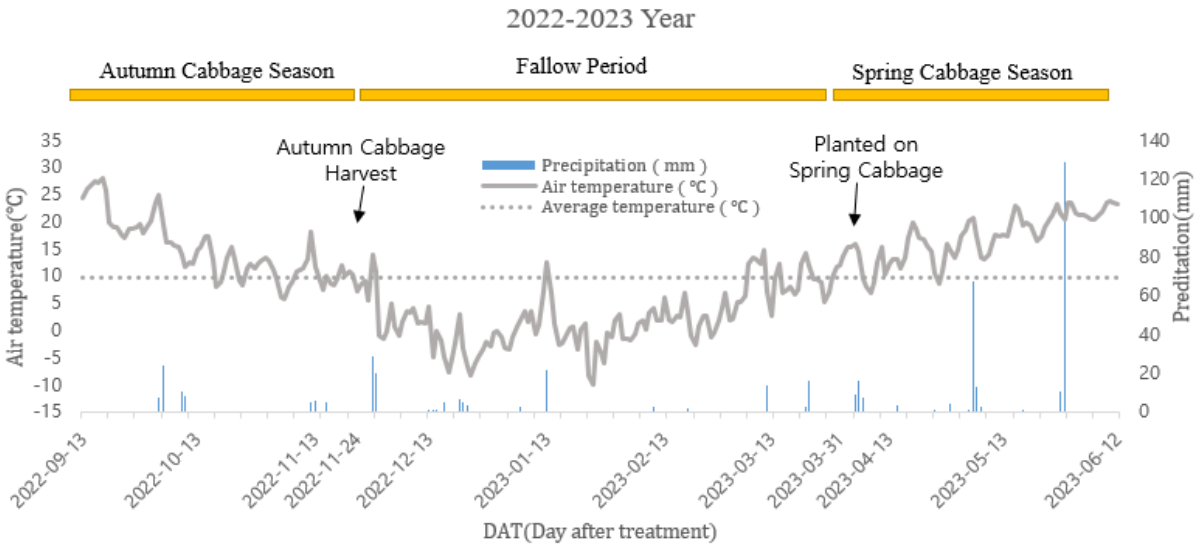

Fig. 1. Temperature and precipitation in the field experiment during the autumn and spring Kimchi cabbage growing seasons.

시험 토양 및 바이오차

토양의 이화학성 분석은 토양 화학분석법(NIAS, 2000)에 준하여 수행했다. pH는 토양과 증류수를 1:5(W/V)로 혼합하고 30분간 교반한 후 pH 측정기(S230 Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. T-C 및 T-N은 원소분석기(Vario Max CN, Elementar, Germany)를 사용하여 분석되었다. 유효인산은 Lancaster법(UV2550PC, Pekinelmer, USA)을 이용하였고, NH_4^+는 Indophenol-Blue 비색법을 이용하였고, NO_3^-는 Brucine법을 이용하여 측정하였다. 1N-NH_4OAc 용액으로 추출한 후 ICP (ICPE-9000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity, CEC)과 치환성 양이온을 분석하였다.

실험 전 토양 pH는 대조구에서 7.8로 가장 높았고 B1이 7.6으로 가장 낮았다. EC는 대조구에서 0.24 dS/m로 가장 높았고 B3에서 0.21 dS/m로 가장 낮았다. T-C 함량은 B1에서 4.85 g/kg으로 가장 높았고 B5에서 3.42 g/kg으로 가장 낮았다. T-N 함량은 B1에서 0.45 g/kg으로 가장 높았고 B3에서 0.33 g/kg으로 가장 낮았다. CEC에서 K^+는 B1에서 0.33 $cmol^+$/kg으로 가장 높았으며, B3에서 0.18 $cmol^+$/kg으로 가장 낮았다. Ca^{2+}는 B3에서 9.97 $cmol^+$/kg으로 가장 높았으며, B1에서 8.21 $cmol^+$/kg으로 가장 낮았다. Mg^{2+}는 대조구에서 4.60 $cmol^+$/kg으로 가장 높았으며, B3에서 4.08 $cmol^+$/kg으로 가장 낮았다. 유효인산을 분석한 결과 B1에서 310.1 mg/kg으로 가장 높게 나타났으며, B3에서 249.6 mg/kg으로 가장 낮게 나타났다(Table 1).

바이오차는 왕겨를 원료로 사용하여 수거와 건조 등 전처리 과정을 거친 후 충청남도 예산에 위치한 바이오차 제조 공장에서 약 500°C의 상향식 통풍형 열분해 방법(Top Lit Up Draft, TLUD)을 통해 탄화로에서 열분해하여 제조하였다. 왕겨 바이오차의 pH는 바이오차와 증류수를 1:10(W/V)의 비율로 혼합하고 30분간 교반한 후 토양분석과 동일한 pH 측정기를 사용하였다. 왕겨 바이오차의 주요 원소 분석으로 N, C, Hydrogen(H)은 Vario MACRO cube (Elementar, Germany)로 분석하였다, Oxygen(O)의 경우 Hand Sand Flash 2000 (Thermo Fisher, Italy)로 분석하였다. 바이오차는 H/C 비율 0.7 이하, O/C 비율 0.4 이하의 경우 미생물 분해의 안정성을 인정받고 있다(European Biochar Certificate, EBC). 또한 국제바이오차협회(International Biochar Initiative, IBI)에서 100년 이상 토양 내 탄소 격리 효과가 있는 것으로 인정하는 비율은 0.7 이하이다. 본 시험의 공시 바이오차 H/C

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

Table 1. Chemical properties by soil characteristics in cropland

Treatment	pH	EC	T-C	T-N	Av. P_2O_5	Ex. cation		
						K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
	(1:5)	(dS/m)	----------(g/kg)----------		(mg/kg)	(cmol$_c$/kg)		
Control	7.8a	0.24a	4.70a	0.35b	295.2ab	0.26a	9.09ab	4.60a
B1	7.6b	0.23a	4.85a	0.45a	310.1a	0.33a	8.21b	4.11ab
B3	7.7ab	0.21a	4.26b	0.33b	249.6c	0.18b	9.97a	4.08ab
B5	7.7ab	0.23a	3.42c	0.36b	279.7bc	0.23a	9.36a	4.23a

B1, Rice hull biochar 1 ton/ha; B3, Rice hull biochar 3 ton/ha; B5, Rice hull biochar 5 ton/ha.
Within each column, values followed by the same letters are not significant at $p<0.05$.

Table 2. Physicochemical properties of rice hull biochar composition content and H/C, O/C molar ratio (%)

Material	pH	T-C	T-N	T-H	Surface area	Molar ratio	
	1:10	g/kg	g/kg	g/kg	m^2/g	H/C	O/C
Rice hull biochar	10.8	566.9	5.7	17.6	71.1±8.8	0.21	0.05

T-C, Total carbon; T-N, Total nitrogen; T-H, Total hydrogen.

비율은 0.21이며, O/C 비율은 각각 0.05로 나타났다(Table 2).

온실가스 포집 및 분석 방법

농경지에서 배출되는 온실가스를 산정하기 위해 CO_2와 N_2O 측정은 밀폐 형태 챔버인 Non-steady-state를 사용하였고[18,19], 온실가스 포집 시 챔버는 외부로의 공기 유출이 없도록 하였다. 밀폐형 챔버는 지름이 24 cm, 높이가 37 cm인 PVC 소재로 각 시험구의 대표 지점의 토양에 9cm 깊이로 배추 작물의 뿌리 활착의 저해를 최소화되도록 설치하였다. 가스 시료 채취 및 측정은 토양에서 배출되는 온실가스의 24시간 중 평균 배출 시간대인 오전 10~12시 사이에 휴대용 FTIR 복합 가스 측정기(GT 5000, Gasmet Technologies Oy, Helsinki, Finland)로 측정하였으며, FTIR 복합 가스 측정기는 20초 간격으로 CO_2, N_2O 등 온실가스 농도를 측정할 수 있다. 온실가스 포집 전 챔버에서 자라나는 잡초를 모두 제거한 후 밀폐시켜 각 처리구마다 밀폐 후 0분, 20분, 40분의 측정값을 추출하여 배출량 산정식인 Eq. (1)에 적용하여 CO_2와 N_2O efflux의 하루 배출량과 주 2회 측정으로 재배기간 누적 배출량을 산정하였다[20]. 온실가스를 채취하지 않는 기간은 챔버 뚜껑을 닫지 않아 챔버 내부로 공기 공급이 원활하게 하였다.

$$CO_2 \text{ and } N_2O \text{ efflux } (mg/m^2/day) = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(T+273)} \quad \text{Eq. (1)}$$

여기서, ρ는 기체밀도(CO_2의 밀도는 1.842 mg/cm, N_2O의 밀도는 1.976 mg/cm), V는 챔버 부피(m^3), A는 챔버 표면적(m^2), $\Delta C/\Delta t$는 챔버 내 단위시간당 CO_2 및 N_2O 증가 농도(mg/m^3/day), T는 대기 온도를 의미한다. 그리고 누적 발생량은 $\Sigma(R\times D)$을 이용하여 재배기간 동안 총 CO_2와 N_2O efflux를 계산하였다. 이때 R은 하루 동안 CO_2 및 N_2O 발생량(mg/m^2/day)이며, D는 시료 채취 공백 기간을 나타낸다.

토양 탄소 수지(Net Ecosystem Carbon Balance, NECB)

토양 농경지 토양 탄소 수지는 NECB 기법은 Eq. (2)를 적용하여 산정하였다[21,22].

$$NECB = \sum C\ input - \sum C\ output = (NPP + Fertilizer + Biochar) - (Respired\ C\ loss + Harvest\ removal) \quad \text{Eq. (2)}$$

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

*C input*은 탄소 유입량이며 비료, 바이오차, 작물 잔여물 및 기타를 유기물로부터의 총 탄소를 말한다. *C output*은 탄소 배출량이며 토양 호흡(CO_2 배출), 수확 및 기타 손실로 인한 총 탄소 배출량을 말한다.

지구온난화 지수 총합(Total GWP), 순 온난화 잠재력(Net GWP)

지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)는 특정 온실가스가 대기 중에 머무는 기간 동안 지구온난화에 미치는 영향을 CO_2와 비교하여 정량적으로 표현한 값이다. 현재 국가 온실가스 배출량 산정 시 적용하는 GWP는 2013년 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서에서 제시된 GWP를 활용하며, N_2O와 메탄(CH_4, Methane)은 각각 265, 28의 값을 적용하고 있다. 따라서 Total GWP는 농경지에서 배출되는 온실가스인 CO_2, N_2O, CH_4의 배출량을 Eq. (3)에 적용하여 산정하였다[23,24]. 다만 CH_4의 경우 담수된 논에서 배출되며, 밭 조건에서는 거의 배출되지 않음으로 본 연구에서는 CH_4 배출량을 포함하지 않았다.

$$Total\ GWP\ (kg\,CO_2-eq/ha) = CO_2 + 265 \times N_2O + 28 \times CH_4 \quad \text{Eq. (3)}$$

순 온난화 잠재력(Net GWP)는 N_2O 배출량을 지구온난화지수 전환한 값에 CO_2 배출량이 반영된 NECB에 의해 격리된 탄소를 빼서 계산하며, Eq. (4)를 적용하여 산정하였다[25,26].

$$Net\,GWP = 265 \times N_2O - \left(\frac{44}{12} \times NECB\right) \quad \text{Eq. (4)}$$

여기서 44/12는 탄소(C)를 CO_2로 변환하는 계수이다. 탄소가 CO_2로 변환될 때, 한 분자의 CO_2는 한 분자의 탄소 원자와 두 분자의 산소 원자로 구성되기 때문에 이 변환이 필요하다.

통계분석

농경지에서 왕겨 바이오차 투입량에 따른 온실가스 배출량 비교는 SPSS statistics 25.0을 이용하여 통계처리 하였다. 처리간 차이를 비교하기 위하여 이원 분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하였다. 또한, F-test 값이 $p<0.05$의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan's multiple range test를 실시하였다.

결 과

토양 내 무기태질소 함량 변화

가을배추 재배기간 동안 토양 내 암모늄태질소(NH_4^+-N) 변화는 재배 초기 3.82~19.4 mg/kg으로 농도가 높았으며, 대조구, B1, B5, B3 처리구 순으로 농도가 높았다. 이후 농도가 낮아졌으며, 11월 상순부터 다시 농도가 증가하였다. 토양 내 질산태질소(NO_3^--N) 변화는 재배 초기 7.21~22.80 mg/kg으로 농도가 높았으며, 대조구, B5, B1, B3 처리구 순으로 농도가 높았다. 이후 전체적으로 높게 유지되었으며, 이후 낮아졌다. 10월 말부터 농도는 다시 높아졌으며, 평균적으로 대조구에서 가장 높았다. 봄배추 재배기간 동안 토양 내 암모늄태질소(NH_4^+-N) 변화는 4월 중순부터 2.61~15.82 mg/kg으로 높았으며, 5월 초순까지 1.56~12.46 mg/kg으로 높게 유지되었다. 토양 내 질산태질소(NO_3^--N)는 가을배추 재배기간 대비 높은 함량을 유지하였다. 재배기간 동안 서서히 증가하였으며 4월 말과 5월 초에 291.7~535.8 mg/kg으로 높았으며, 이후 서서히 감소하였다(Fig. 2).

배추 수확량

가을배추와 재배기간 동안 생육은 정식 82일 후 수확하였고 지상부 생체중은 대조구, B1, B3, B5 처리구에서 각각 2.70, 2.58, 2.52, 2.40 kg/plant이며 처리구간 통계적 유의한 차이는 발생하지 않았다. 처리구별 수확한 지상부 생체중의 수분함량은

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

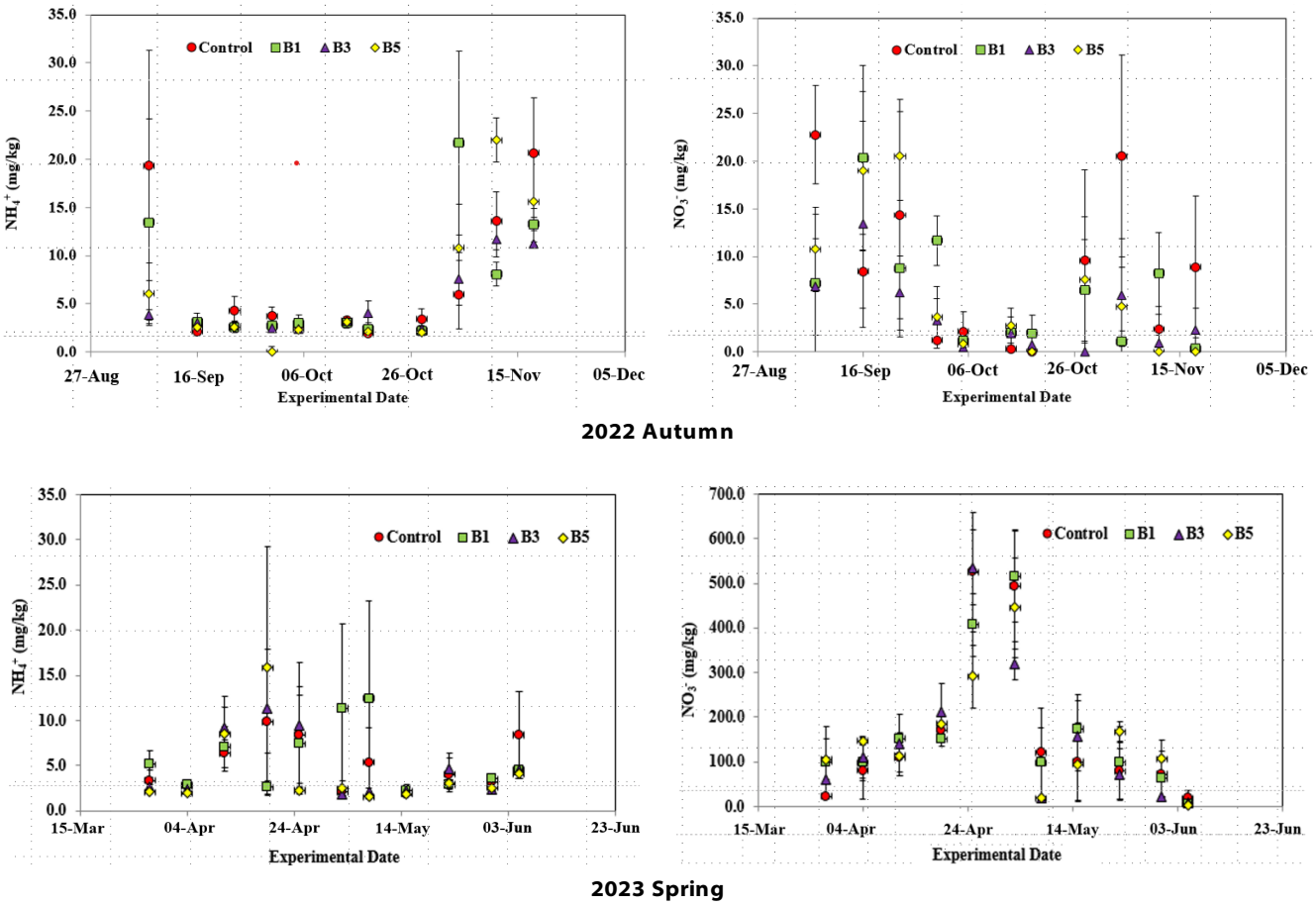

Fig. 2. Temporal changes in soil ammonium nitrogen (NH_4^+-N) and Nitrate nitrogen (NO_3^--N) during autumn and spring cabbage cultivation periods.

Values are the means of triplicate, and vertical bars are the standard errors of the means (n=3). Error bars are often too small to be depicted.

91.0~91.3%였다. 봄배추는 정식 65일 후 수확하였고 생체중 기준 1구당 대조구에서 3.02 kg으로 가장 높았으며, B1, B3, B5 처리구 각각 2.68, 2.95, 2.82 kg이며, 처리구간 통계적 유의한 차이는 발생하지 않았다.

시기별 온실가스 배출량

재배기간 동안 시기별 CO_2와 N_2O 배출량 Fig. 3과 같다. CO_2의 경우 가을배추 재배기간 동안 토양 호흡을 통한 CO_2 배출량은 10월 중순까지 전체적으로 증가하여 5.38~10.92 g/m^2·day의 범위로 배출되었고 대기 평균온도가 20°C 이하로 내려가는 기간부터 CO_2 배출량은 서서히 감소하였다. 봄배추 재배기간 동안 CO_2 배출량은 정식 직후 2.24~4.20 g/m^2·day의 범위로 증가하였고 4월 중순까지 서서히 감소하였다. 4월 중순 이후 대기 온도는 15°C 이상으로 증가하였고, 그에 상응하게 CO_2 배출량도 4.23~6.32 g/m^2·day의 범위로 증가하였다. N_2O의 경우, 가을배추 재배기간 동안 재배 초기 1.69~5.09 mg/m^2·day의 범위로 높게 배출되었으며, 웃거름 투입 시기에도 N_2O 배출량은 증가하였다. 봄배추 재배기간 동안 N_2O 배출량은 5월 초까지 전체적으로 2 mg/m^2·day 이하로 배출되었지만, 5월 말 웃거름이 투입되고 대기 온도가 20°C 이상 증가할 때 대조구에서 11.2 mg/m^2·day이 배출되고 바이오차 투입 처리구에서는 8.24~9.83 mg/m^2·day의 범위로 배출되었다(Fig. 3).

온실가스 누적 배출량

가을배추 재배기간 처리구별 누적 CO_2 배출량은 대조구, B1, B3, B5에서 각각 3.28, 3.23, 3.29, 3.73 t/ha로 나타났다. 누적 N_2O 배출량은 대조구, B1, B3, B5에서 각각 1.32, 1.28, 0.99, 0.78 kg/ha로 나타났다. 바이오차 투입량에 비례하여 배출량은 감소하

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

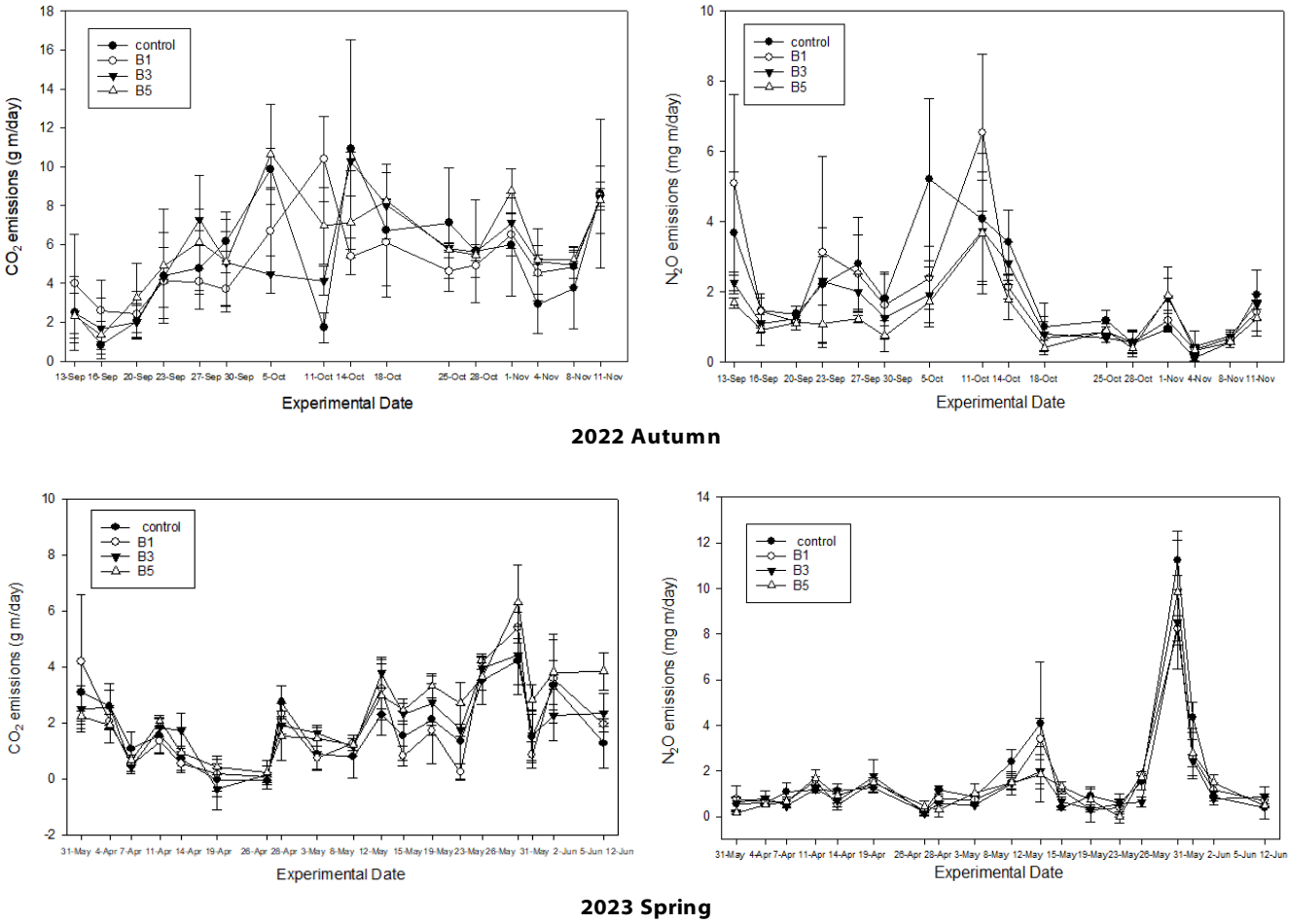

Fig. 3. Greenhouse gas emissions from sandy loam cropland to the application of rice hull biochar under closed chamber conditions for autumn and spring seasons.

Values are the means of triplicate, and vertical bars are the standard errors of the means (n=3). Error bars are often too small to be depicted.

였으며, 대조구 대비 B1, B3, B5 처리구에서 각각 2.9, 25.4, 41.1%로 N_2O 배출량이 감소하였다. 봄배추 재배기간 처리구별 누적 CO_2 배출량은 대조구, B1, B3, B5에서 각각 1.30, 1.34, 1.45, 1.68 t/ha로 나타났다. 누적 N_2O 배출량은 대조구, B1, B3, B5에서 각각 1.28, 1.07, 0.94, 1.09 kg/ha로 나타났다(Table 3). 바이오차를 3 t/ha 투입 시 대조구 대비 26.5%까지 배출량은 감소하였다.

농경지 토양 탄소 수지(NECB)

가을배추 재배기간의 NECB는 대조구에서 1.96 t/ha, B1에서 2.58 t/ha, B3에서 3.65 t/ha, B5에서 4.58 t/ha로 나타났다. 바이오차 투입량에 비례하여 토양 탄소 수지는 증가하였으며, 대조구 대비 B1, B3, B5 처리구에서 각각 0.62, 1.69, 2.70 t/ha 증가하였다. 봄배추 재배기간의 NECB는 Control, B1, B3, B5에서 각각 2.49, 3.03, 4.13, 5.19 t/ha로 나타났다(Table 3). 바이오차 투입량에 비례하여 토양 탄소 수지는 증가하였으며, 대조구 대비 B1, B3, B5 처리구에서 각각 0.54, 1.64, 2.70 t/ha 증가하였다.

Total GWP

가을배추 재배기간 동안 CO_2 배출을 포함한 Total GWP는 가을배추 대조구에서 3.63 t/ha, B1에서 3.57 t/ha, B3에서 3.55 t/ha, B5에서 3.93 t/ha로 나타났다. 이는 바이오차 투입량이 증가함에 따라 Total GWP가 크게 변화하지 않음을 보여주었다. 봄배추 재배기간 동안 CO_2 배출을 포함한 Total GWP는 대조구와 B1에서 1.63 t/ha, B3에서 1.69 t/ha, B5에서 1.97 t/ha로 나타났다. 봄배추에서 바이오차 투입량이 증가할수록 Total GWP가 증가하는 경향을 보였다.

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

Table 3. Cumulative Greenhouse gases, Net Ecosystem Carbon Balance(NECB), Total GWP and Net GWP for different treatments during the Autumn and Spring Kimchi cabbage seasons

Treatment	CO_2 Emissions		N_2O Emissions		NECB		Total GWP		Net GWP	
	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring
	--------(t/ha)--------		-------(kg/ha)-------		--------(t/ha)--------		--------(t/ha)--------		--------(t/ha)--------	
Control	3.28b	1.30b	1.32a	1.28a	1.96c	2.49d	3.63b	1.63a	-6.84d	-8.80d
B1	3.23b	1.34b	1.28a	1.07a	2.58c	3.03c	3.57b	1.63a	-9.12c	-10.84c
B3	3.29b	1.45a	0.99b	0.94b	3.65b	4.13b	3.55b	1.69a	-13.12b	-14.91b
B5	3.73a	1.68a	0.78c	1.09a	4.58a	5.19a	3.93a	1.97b	-16.59a	-18.74a

Duncan's Multiple Range Test was conducted to compare the means of treatments, with statistical significance assessed at the $p>0.05$ level.

Net GWP

가을배추 재배기간 동안 CO_2 배출을 포함한 Net GWP는 바이오차 투입량이 증가할수록 Net GWP가 감소하여, 대조구에서 –6.84 t/ha, B1에서 -9.12 t/ha, B3에서 -13.12 t/ha, B5에서 -16.59 t/ha로 나타났다. 이는 바이오차가 토양 내 탄소 격리 효과를 증대시키는 것을 보여주었다. 봄배추 재배기간 동안 Net GWP는 대조구에서 -8.80 t/ha, B1에서 -10.84 t/ha, B3에서 -14.91 t/ha, B5에서 -18.74 t/ha로 탄소 흡수 효과가 증진하였다(Table 3).

고 찰

본 연구는 배추 재배지에서 왕겨 바이오차를 가을과 봄배추 재배기간 동안 온실가스 배출량을 측정하였다. 그리고 농경지 토양 탄소 수지와 이를 반영한 순 지구온난화 잠재력을 비교 평가하였다. CO_2 배출은 봄배추 재배기간보다 가을배추 재배기간에 전체적으로 높게 나타났다. 이는 높은 기온이 미생물 활동을 촉진하여 CO_2 배출을 증가시켰으며, 강수량이 미생물 호흡을 통해 온실가스 배출에 중요한 영향을 미친다는 기존 연구 결과와도 부합한다[27]. 바이오차를 가장 많이 투입한 B5 처리구에서 상대적으로 높은 CO_2 배출량이 관찰되었다. B5 처리구에서 CO_2 배출이 증가한 것은 왕겨 바이오차의 적용량이 많아질수록 토양 내 미생물 활성도를 높여 탄소배출을 촉진한 결과로 해석될 수 있다[28]. 이는 바이오차의 투입량이 적정 수준 이상 투입하면 토양 내 CO_2 배출량이 증가함을 시사한다[29].

N_2O 배출은 질소원을 토양에 공급하면 토양 내 질소 순환 과정으로 질산화 및 탈질 과정에서 부차적으로 배출된다[30]. 이러한 농경지 N_2O 배출은 바이오차 투입으로 상당량을 줄일 수 있으며, 선행연구 결과 NH_4^+-N 흡착[31] 및 탈질 촉진[32] 등의 과정을 통해 배출량을 줄일 수 있는 결과를 제시하였다. 본 연구 결과에서도 바이오차 투입으로 N_2O 배출량을 줄일 수 있었다. 가을배추 재배기간 동안 B5 처리구가 0.78 kg/ha로 가장 낮은 배출량을 나타냈고. 봄배추 재배기간에는 B3 처리구에서 0.94 kg/ha로 대조구 대비 통계적 유의한 차이를 나타내면 감소하였다. 즉 바이오차를 연용 투입 시 ha 당 3 ha 투입 시 N_2O 배출량을 가장 효과적으로 줄일 수 있었다. 이러한 N_2O 배출변화는 토양 내 질소의 순환과정 중 배출됨으로 온실가스 측정기간 토양 내 무기태질소 변화를 해석하여 그에 따른 기작을 분석하고자 하였다. 2022년 가을배추 재배 초기 NH_4^+-N은 빠르게 NO_3^--N로 전환되며, NO_3^--N는 NH_4^+-N가 감소하는 시점에 급격히 상승한 후 서서히 감소하였다. 이는 질소비료가 토양 내 미생물에 의한 질산화가 활발히 이루어져 질산태질소가 급격히 증가하고, 이후 작물 흡수와 탈질화 과정에 의해 NO_3^--N가 점차 감소한 경향을 나타냈다[33]. 이는 가을배추 및 봄배추 재배기간에서도 같은 형상을 확인할 수 있었다. 즉 NO_3^--N가 감소하면서 탈질 과정이 진행됨을 예측할 수 있으며, 해당 기간에 N_2O 배출이 많이 증가하였다. 토양 내 무기태질소 변화로 질소 순환과정을 예측할 수 있지만, 바이오차 투입에 따른 정량적인 영향은 해석하기 부족하였다. 따라서 탈질화 유전자 분석과 같은 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 향후 탈질화 경로를 이해하기 위한 탈질 유전자 분석 등의 연구를 통해 기작을 해석하는 연구가 필요할 것이다[34].

바이오차 투입으로 NECB는 직접적인 영향을 받았다. 가을배추 재배기간 동안 대조구를 제외한 모든 처리구에서 NECB가 바이오차 투입량에 비례하여 증가하였다. 이는 바이오차가 토양 내 이분해성 유기물을 분해하지만, 그에 비해 많은 양의 탄소를

https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12
Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 117-127

저장하였기 때문이다[35]. 봄배추 재배기간도 NECB는 바이오차 투입량에 비례하여 증가했으며, 특히 B5 처리구에서 5.19 t/ha로 가장 높게 나타났다. 즉 재배기간의 기상 상황의 차이에도 불구하고 바이오차는 농경지 투입 시 탄소 저장소로서 작용할 가능성을 보여준다[36]. Park[20] 등의 연구에 따르면, 왕겨 바이오차 처리가 비옥도가 낮은 배추 재배지에서 토양 탄소 수지는 증가시키고, 온실가스 배출량을 감소시켰다. 이는 바이오차가 토양의 탄소 저장 능력을 향상해, 장기적으로 기후변화 완화에 기여할 수 있음을 시사한다. NECB가 봄배추 재배기간에 더 높게 나타난 이유로는 바이오차 연용 시 탄소 저장 및 격리 효과가 증진됨을 확인할 수 있다.

Net GWP는 농경지 탄소 수지와 온실가스 배출 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 지표이며, 바이오차 3 t/ha 이상 투입 시 CO_2 배출은 증가했지만, 탄소 저장·격리 효과가 더 높아 Net GWP는 감소하였다. 바이오차 투입량에 비례하여 Net GWP는 가을배추 및 봄배추 재배기간 동안 감소량은 증가하였다. 이는 바이오차의 투입량이 증가함에 따라 CO_2, N_2O 변화보다 토양 탄소 저장·격리 효과가 더욱 큰 영향을 주었기 때문이다. 이와 같은 경향은 바이오차 연속적으로 투입하였을 때 효과는 더욱 크게 나타났다[37]. 하지만 바이오차의 구매 비용과 과량 투입 시 환경적 우려되는 사항도 있으므로 농경지에 투입하는 바이오차의 적정 사용량 설정 등의 과제도 해결해야 농경지 바이오차 적용은 지속 가능한 저탄소 농업기술로써 활용될 것이다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: D.-G.P. wrote the manuscript and performed the analysis; D.-G.P and H.-S.L. carried out the experiments and performed analysis; H.-W.K, M.-J.L. and H.-R.P. contributed to the interpretation of results; S.-I.L. and T.-K.O. conceived the idea, revised the manuscript and supervised the findings of this work.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2021-RD009776)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.12

Correspondence and requests for materials should be addressed to Sun-Il Lee and Taek-Keun Oh.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at http://www.korseaj.org

References

1. Gomiero T (2016) Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. Sustainability, 8(3), 281. https://doi.org/10.3390/su8030281.
2. Liu Q, Meki K, Zheng H, Yuan Y, Shao M, Luo X, Xing B (2023) Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change. Biochar, 5(1), 45. https://doi.org/10.1007/s42773-023-00244-8.
3. Manzoni S, Taylor P, Richter A, Porporato A, Ågren GI (2012) Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. New Phytologist, 196(1), 79-91. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x.
4. Yu H, Zou W, Chen J, Chen H, Yu Z, Huang J, Tang H, Wei X, Gao B (2019) Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. Journal of Environmental Management, 232, 8-21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117.
5. Weber K, Quicker P (2018) Properties of biochar. Fuel, 217, 240-261. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054.
6. Wu H, Qi Y, Dong L, Zhao X, Liu H (2019) Revealing the impact of pyrolysis temperature on dissolved organic matter released from the biochar prepared from *Typha orientalis*. Chemosphere, 228, 264-270. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.143.
7. Hussain M, Farooq M, Nawaz A, Al-Sadi AM, Solaiman ZM, Alghamdi SS, Ammara U, Ok YS, Siddique KHM (2017) Biochar for crop production: Potential benefits and risks. Journal of Soils and Sediments, 17, 685-716. https://doi.org/10.1007/s11368-016-1360-2.

8. Ramamoorthy K, Mary PCN, Bose KSC Karthikeyan B, Manivelan K (2024) Effect of biochar on soil health and crop productivity: A review. Agricultural Reviews, 45(1), 121-126. https://doi.org/10.18805/ag.R-2379.
9. Wijitkosum S, Sriburi T (2018) Increasing the amount of biomass from field crops for carbon sequestration and plant biomass enhancement using biochar, in: Abrol V, Sharma P, Biochar – An Imperative Amendment for Soil and the Environment. pp. 35-54, IntechOpen Ltd., London, UK.
10. Dai Y, Wang W, Lu L, Yan L, Yu D (2020) Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus. Journal of Cleaner Production, 257, 120573. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120573.
11. Asadi H, Ghorbani M, Rezaei-Rashti M, Abrishamkesh S, Amirahmadi E, Chen C, Gorji M (2021) Application of rice husk biochar for achieving sustainable agriculture and environment. Rice Science, 28(4), 325-343. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.05.004.
12. Qambrani NA, Rahman MM, Won S, Shim S, Ra C (2017) Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 255-273. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057.
13. Park SH, Jang SW, Choi SK (2020) Developing double-haploid inbred lines of 'Wonkyo20051ho' kimchi cabbage (*Brassica rapa* L.) characterized by formation of tight head at low temperatures. Korean Journal of Breeding Science, 52(1), 41-52. https://doi.org/10.9787/kjbs.2020.52.1.41.
14. Bisbis MB, Gruda N, Blanke M (2018) Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality–A review. Journal of Cleaner Production, 170, 1602-1620. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224.
15. Warland J, McKeown AW, McDonald MR (2006) Impact of high air temperatures on Brassicacae crops in southern Ontario. Canadian Journal of Plant Science, 86(4), 1209-1215. https://doi.org/10.4141/P05-067.
16. Chun JH, Kang YG, Lee JH, Yun YU, Oh TK, Yoon MH (2022) The combined effect of nitrogen and biochar amendments on the yield and glucosinolate contents of the Chinese cabbage. Journal of King Saud University-Science, 34(2), 101799. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101799.
17. da Silva ALBR, Candian JS, do Rego ER, Coolong T, Dutta B (2020) Screening cabbage cultivars for resistance to black rot under field conditions. HortTechnology, 30(3), 448-455. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04481-19.
18. Livingston GP, Hutchinson GL, Spartalian K (2006) Trace gas emission in chambers: A non-steady-state diffusion model. Soil Science Society of America Journal, 70(5), 1459-1469. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0322.
19. de Klein CA, Harvey MJ, Clough TJ, Petersen SO, Chadwick DR, Venterea RT (2020) Global Research Alliance N_2O chamber methodology guidelines: Introduction, with health and safety considerations. Journal of Environmental Quality, 49(5), 1073-1080. https://doi.org/10.1002/jeq2.20131.
20. Park DG, Jeong HC, Jang EB, Lee JM, Lee HS, Park HR, Lee SI, Oh TK (2024) Effect of rice hull biochar treatment on net ecosystem carbon budget and greenhouse gas emissions in Chinese cabbage cultivation on infertile soil. Applied Biological Chemistry, 67(1), 44. https://doi.org/10.1186/s13765-024-00903-9.
21. Qi L, Pokharel P, Chang SX, Zhou P, Niu H, He X, Wang Z, Gao M (2020) Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable–rice rotation. Agriculture, Ecosystems & Environment, 292, 106831. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106831.
22. Guo R, Qian R, Naseer MA, Han F, Zhang P, Jia Z, Chen X, Ren X (2024) Integrated straw-derived biochar utilization to increase net ecosystem carbon budget and economic benefit and reduce the environmental footprint. Field Crops Research, 307, 109247. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109247.
23. Kitamura R, Sugiyama C, Yasuda K, Nagatake A, Yuan Y, Du J, Yamaki N, Taira K, Kawai M et al. (2021) Effects of three types of organic fertilizers on greenhouse gas emissions in a grassland on andosol in southern Hokkaido, Japan. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 649613. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.649613.
24. Sainju UM, Barsotti JL, Wang J (2014) Net global warming potential and greenhouse gas intensity affected by cropping sequence and nitrogen fertilization. Soil Science Society of America Journal, 78(1), 248-261. https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0325.
25. Ma YC, Kong XW, Yang B, Zhang XL, Yan XY, Yang JC, Xiong ZQ (2013) Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice–wheat rotations with integrated soil–crop system management. Agriculture, Ecosystems and Environment, 164, 209-219. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.11.003.
26. Hwang HY, Kim GW, Kim SY, Haque MM, Khan MI, Kim PJ (2017) Effect of cover cropping on the net global warming potential of rice paddy soil. Geoderma, 292, 49-58. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.001.
27. Yan G, Mu C, Xing Y, Wang Q (2018) Responses and mechanisms of soil greenhouse gas fluxes to changes in precipitation intensity and duration: a meta-analysis for a global perspective. Canadian Journal of Soil Science, 98(4), 591-603. https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0002.
28. Pokharel P, Ma Z, Chang SX (2020) Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra-and intracellular enzyme activities: A global meta-analysis. Biochar, 2, 65-79. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00039-1.
29. Atilano-Camino MM, Canizales Laborin AP, Ortega Juarez AM, Valenzuela Cantú AK, Pat-Espadas AM (2022) Impact of soil amendment

with biochar on greenhouse gases emissions, metals availability and microbial activity: A meta-analysis. Sustainability, 14(23), 15648. https://doi.org/10.3390/su142315648.
30. Han B, Yao Y, Liu B, Wang Y, Su X, Ma L, Liu D, Niu S, Chen X et al. (2024) Relative importance between nitrification and denitrification to N_2O from a global perspective. Global Change Biology, 30(1), e17082. https://doi.org/10.1111/gcb.17082.
31. Lee JM, Park DG, Kang SS, Choi EJ, Gwon HS, Lee HS, Lee SI (2022) Short-term effect of biochar on soil organic carbon improvement and nitrous oxide emission reduction according to different soil characteristics in agricultural land: A laboratory experiment. Agronomy, 12(8), 1879. https://doi.org/10.3390/agronomy12081879.
32. Zhang L, Jing Y, Chen C, Xiang Y, Rezaei Rashti M, Li Y, Deng Q, Zhang R (2021) Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. GCB Bioenergy, 13(12), 1859-1873. https://doi.org/10.1111/gcbb.12898.
33. Zhou R, El-Naggar A, Li Y, Cai Y, Chang SX (2021) Converting rice husk to biochar reduces bamboo soil N_2O emissions under different forms and rates of nitrogen additions. Environmental Science and Pollution Research, 28, 28777-28788. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12744-w.
34. Saggar S, Jha N, Deslippe J, Bolan NS, Luo J, Giltrap DL, Kim DG, Zaman M, Tillman RW (2013) Denitrification and N_2O: N_2 production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. Science of the Total Environment, 465, 173-195. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.050.
35. Gross A, Bromm T, Glaser B (2021) Soil organic carbon sequestration after biochar application: a global meta-analysis. Agronomy, 11(12), 2474. https://doi.org/10.3390/agronomy11122474.
36. Kang SW, Yun JJ, Park JH, Cho JS (2021) Exploring suitable biochar application rates with compost to improve upland field environment. Agronomy, 11(6), 1136. https://doi.org/10.3390/agronomy11061136.
37. Wu Z, Zhang X, Dong Y, Li B, Xiong Z (2019) Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: Six-year field observation and meta-analysis. Agricultural and Forest Meteorology, 278, 107625. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107625.