

Research Article



CrossMark

Open Access

시설재배지에서 바이오차 연용이 토양의 화학적 특성 및 온실가스 배출에 미치는 효과

박재혁¹, 김동욱², 강세원^{1,3}, 조주식^{1,3*}

¹순천대학교 일반대학원 농화학과 & 순천대학교 IT-Bio융합시스템전공, ²㈜알에이치에코랩,
³순천대학교 생명산업과학대학 농생명과학과

Effect of Continuous Biochar Use on Soil Chemical Properties and Greenhouse Gas Emissions in Greenhouse Cultivation

Jae-Hyuk Park¹, Dong-Wook Kim², Se-Won Kang^{1,3} and Ju-Sik Cho^{1,3*} (Department of Agricultural Chemistry, Graduate School, Suncheon National University & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea, ²RH Ecolab Co. Ltd., Jeonju 54865, Korea, ³Department of Agricultural Life Science, College of Life Science and Natural Resources, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea)

Received: 15 December 2023/ Revised: 19 December 2023/ Accepted: 22 December 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

ORCID

Jae-Hyuk Park
<https://orcid.org/0000-0001-6073-0185>

Dong-Wook Kim
<https://orcid.org/0009-0008-6078-558X>

Se-Won Kang
<https://orcid.org/0000-0003-2038-5465>

Ju-Sik Cho
<https://orcid.org/0000-0001-9610-5373>

Abstract

Global concern over climate change, driven by greenhouse gas emissions, has prompted widespread interest in sustainable solutions. In the agricultural sector, biochar has emerged as a focal point for mitigating these emissions. This study investigated the impact of continuous biochar application on CO₂ and N₂O emissions during the spring cabbage cultivation period. Greenhouse gas emissions in the biochar treatment groups (soils treated with 1, 3, and 5 tons/ha of rice husk biochar) were compared to those in the control group without biochar. During the spring cabbage cultivation period in 2022, the total CO₂ emissions were in the range of 71.6-119.0 g/m²day, and in 2023, with continuous biochar application, they were in

the range of 71.6-102.1 g/m²day. The total emissions of N₂O in 2022 and 2023 were in the range of 11.7-23.7 and 7.8-19.9 g/m²day, respectively. Overall, greenhouse gas emissions decreased after biochar treatment, confirming the positive influence of biochar on mitigating greenhouse gas release from the soil. Nevertheless, further research over an extended period exceeding five years is deemed essential to delve into the specific mechanisms behind these observed changes and to assess the long-term sustainability of biochar's impact on greenhouse gas dynamics in agricultural settings.

Key words: Biochar, Cabbage, Continuous application, Greenhouse gas

* Corresponding author: Ju-Sik Cho
Phone: +82-61-750-5182; Fax: +82-61-750-8011;
E-mail: chojs@scnu.ac.kr

서론

기후변화가 가속화됨에 따라 국제적으로 기후변화 문제에 대응하기 위해 여러 정책들을 실시하고 있으며, 국내에서는 한국판 뉴딜 종합계획을 발표하여 국가 온실가스 감축목표 달성 (NDC, Nationally Determined Contribution)을 이행하고 있다[1]. 농업의 경우, 2050 탄소중립 정책을 통해 2050년까지 2018년(24.7백만 톤) 대비 37.7%의 온실가스를 감축하여 15.4 백만 톤 배출량을 목표로 온실가스 저감에 대한 연구들이 진행되고 있다[2]. 농업분야에서 탄소중립과 온실가스 저감에 있어서 바이오차(Biochar)가 효과적인 물질로 평가를 받고 있으며[3], 이에 따라 바이오차를 활용한 농경지 온실가스 저감 및 탄소중립에 대한 연구가 많이 되고 있는 실정이다[4-6].

바이오차는 바이오매스(Biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 바이오매스를 혐기적 조건에서 열분해시킨 물질로써 탄소함량이 높으며, 안정된 방향족 구조로 배열되어 분해가 어려운 탄소형태로 구성된다[7]. 바이오매스를 안정한 탄소형태로 고정하는 것 외에 바이오차를 토양에 처리할 경우, 바이오차의 넓은 비표면적에 의한 양분보유능력의 증가와 이에 따른 농경지 질소 손실 감소로 무기질 비료의 사용량을 절감시킬 수 있다. 또한 토양 내 공극 및 통기성 증가로 인한 N₂O 배출 저감과 pH 증가로 인한 N₂O 환원효소의 활성을 통해 온실가스 배출을 감축시킬 수 있다고 평가된다[8]. 추가적으로 바이오차를 토양에 처리하면 양이온 교환 용량, 수분 보유 능력, 양분 보유 능력 및 미생물 활성 등 토양개량을 통해 작물의 생육, 생산성 및 품질 향상에 효과가 있으며[9], 다양한 온도, 열분해 시간, 원료의 종류에 따라 다양한 특성이 나타나기 때문에 농업에서의 활용도가 높다고 판단된다[10].

그러나, 바이오차가 안정된 탄소 구조라고 할지라도 바이오차의 원료 및 생산조건 등에 따른 바이오차 내부 유해성분, PAH의 용출로 인한 토양 및 작물에 위해성이 있을 수 있다 [11]. 특히, Wang 등[12]의 연구에서는 토양에 처리된 바이오차가 시간이 지남에 따라 입자크기가 감소하며, 이는 토양 공극을 줄이고 바이오차의 안정성에 영향을 미칠 수 있다고 하였다. 이와 같이 토양에 적용시킨 바이오차는 시간이 지남에 따라 구조, 비표면적, 탄소함량 등이 변화하기 때문에 바이오차를 적용한 후에도 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다. 이에 본 연구는 봄배추 재배지에서 왕겨 바이오차의 연용

처리를 통해 배추의 생육, 토양 화학적 특성 및 온실가스 감축 효과를 평가하였다.

재료 및 방법

공시토양 특성

본 연구는 전라남도 순천시 서면에 위치한 시설재배지 (34°59'54.8"N 127°30'23.6"E)에서 수행되었으며, 시설재배지 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 토양의 pH 및 CEC는 각각 6.68 및 12.9 cmol_c/kg으로 배추재배에 적합하였으며, EC 및 OM은 3.70 dS/m, 43.8 g/kg으로 배추재배 적정 범위의 2 dS/m 이하 및 25-35 g/kg보다 높은 것으로 조사되었다. 이는 시설재배지에서 지속적으로 비료를 사용하여 토양에 양분이 집적된 것으로 판단된다.

바이오차 특성

바이오차는 왕겨숯 제조공장 탄화로에서 500°C 온도조건에서 약 4시간 TLUD (Top lit up draft) 방식으로 열분해하여 제조하였다. 바이오차의 탄소함량은 53.8%였으며, pH 및 EC 등의 화학적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같다.

재배관리

바이오차 처리에 따른 온실가스 배출량 및 토양의 화학적 특성 변화를 조사하기 위하여 공시작물로 진청배추를 선정하였다. 처리구 크기와 재식거리는 각각 4m² (2×2 m) 및 45×45 cm였으며, 한 시험구당 16주의 배추모종을 정식하였다. 재배기간 동안 비닐멀칭으로 토양을 피복하였으며, 처리구는 각각 3반복으로 수행되었다. 배추는 2022년과 2023년도에 재배하였으며, 2022년은 4월 21일부터 7월 4일까지 75일간 재배하였고 2023년은 4월 7일부터 6월 5일까지 60일간 재배하였다. 재배기간 동안의 토양온도 및 토양수분함량은 Fig. 1에 나타내었으며, 2022년과 2023년도 평균 토양온도는 26.3°C 및 22.3°C였으며, 평균 토양수분함량은 13.7% 및 4.33%로 2022년에 비해 2023년 토양온도 및 토양수분함량이 다소 낮았다.

처리조건

처리조건은 바이오차를 처리하지 않은 대조구(BC0)와 바이오차를 각각 1, 3 및 5 t/ha (BC1, BC3, BC5)를 처리한 처리

Table 1. Chemical properties of the experiment raw soil

| pH (1:5) | EC (dS/m) | T-C | | Av. P ₂ O ₅ (mg/kg) | Ex. cation (cmol _c /kg) | | | |
|-------------|--------------|------------|------|--|------------------------------------|------|------|------|
| | | - - (g/kg) | - - | | K | Ca | Mg | CEC |
| 6.68 | 3.70 | 25.4 | 2.71 | 285 | 0.66 | 9.52 | 1.58 | 12.9 |

Table 2. Chemical properties of biochar

| pH (1:10) | EC (dS/m) | H C N K Ca Mg | | | | | |
|--------------|--------------|----------------------------|-----|------|------|------|------|
| | | - - - - - (g/kg) - - - - - | | | | | |
| 10.7 | 4.58 | 2.95 | 538 | 6.17 | 10.0 | 1.51 | 1.32 |

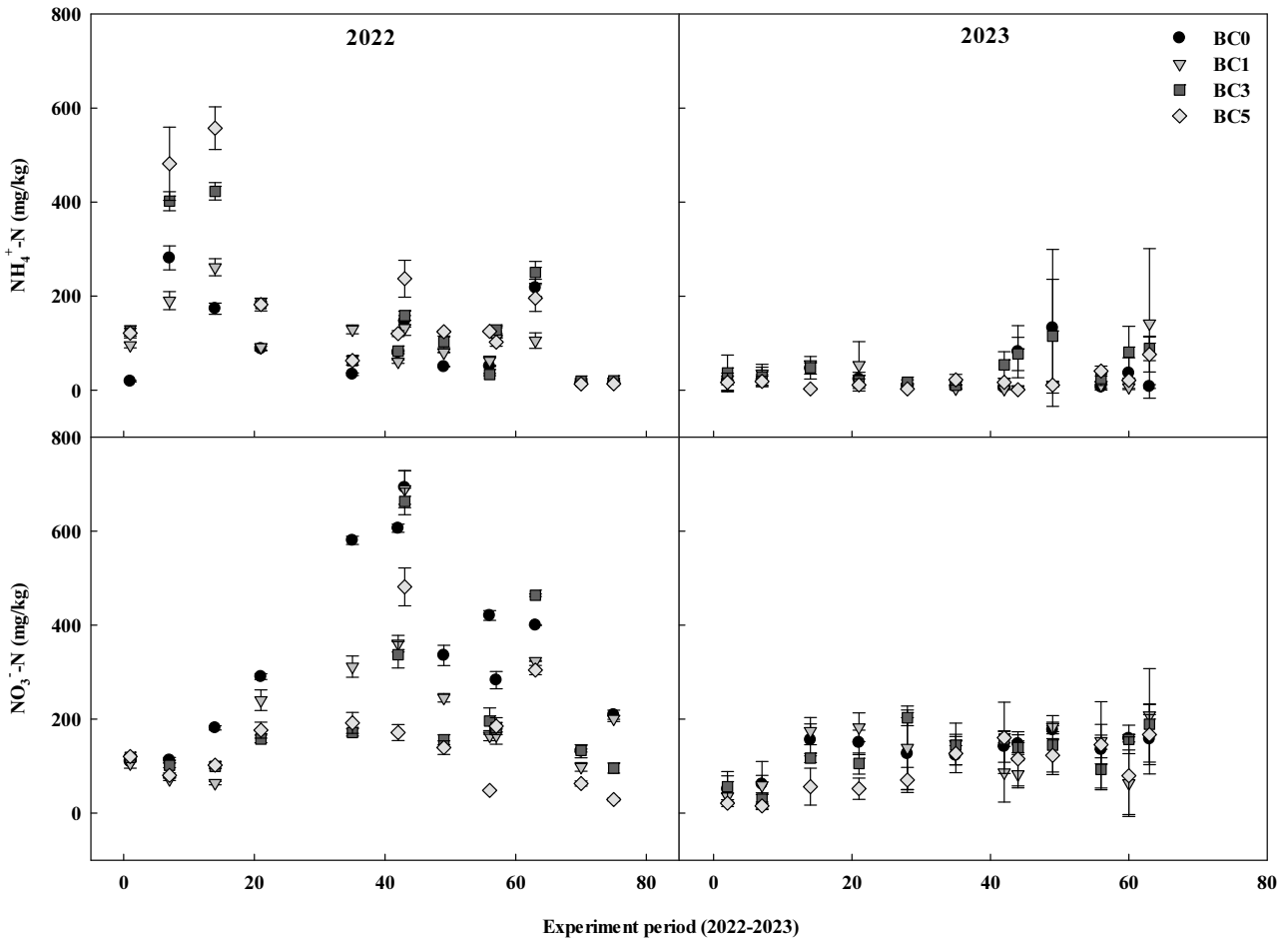


Fig. 1. Changes in mineral nitrogen content in the soil during the spring cabbage.

구로 나뉘었으며, 모든 처리구에 농촌진흥청 '작물별 비료사용처방'에 준하여 배추 적정시비량인 N-P₂O₅-K₂O (17.8-3.0-7.3 kg/10a)를 토양에 처리하였다. 바이오차와 무기질 비료는 정식 2주 전에 토양에 처리하였으며, 무기질 비료의 경우에 정식 30일과 45일에 각각 추비하였다. 생육특성은 수확 후 배추의 생체량, 엽장 및 엽폭을 조사하였다.

분석방법

공시토양 및 수확 후 토양시료의 분석은 풍건시킨 토양을 2 mm 체에 통과시켜 화학성 분석을 수행하였다. 토양의 pH 및 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 침출하여 pH meter 및 EC meter (S230, Mettler Toledo, Zurich, Switzerland)로 분석하였다. 토양 유효인산은 Lancaster법(Ubi-490, Microdigital, Korea)을 이용하였으며, 치환성 양이온의 경우에 1N-NH₄OAc 용액으로 침출 후 ICP (ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 사용하여 분석하였고 T-C 및 T-N은 원소분석기(EA2400II, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

바이오차의 pH 및 EC는 바이오차와 증류수를 1:10 비율로 침출하여 pH meter와 EC meter를 이용하여 분석하였으며, T-C 및 T-N은 토양 분석과 동일한 방법으로 분석하였다.

바이오차의 T-P, K, Ca 및 Mg는 습식분해법(H₂SO₄-HClO₄)으로 분해하여 T-P는 Vanadate법(Ubi-490, Microdigital, Korea), 그 외 무기성분은 ICP (ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하여 분석하였다.

온실가스 채취 및 flux 측정

재배기간 동안 온실가스는 Static chamber method를 이용하여 온실가스를 포집하였다. 챔버는 30 cm (Ø) × 50 cm (H)의 원통형 플라스틱 챔버를 이용하였으며, 처리구 중앙에 5 cm 깊이로 설치하여 포집하였다. 온실가스는 주 1회 오전 10시에서 12시 사이에 30분간 배출되는 온실가스를 3 way stopper가 부착된 주사기로 포집하였으며, 강우나 추비와 같은 이벤트 발생 시 추가로 가스 채취를 실시하였다. 포집된 시료는 가스크로마토그래피(8890 GC system, Agilent, USA)를 이용하여 N₂O, CO₂ 및 CH₄의 정량분석을 실시하였다[13]. 배출되는 온실가스는 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T)$$

F는 N₂O, CO₂ 및 CH₄ flux 값이며, ρ는 해당 기체 밀도 (mg/cm³), V는 챔버의 부피(m³), A는 챔버 면적(m²), Δc/

Δt 는 챔버 내 단위시간당 온실가스 농도 변화량, T는 챔버 내 온도(°C)를 의미한다. 재배기간 동안 배출되는 온실가스는 아래 공식과 같이 온실가스 배출량에 지구온난화지수를 곱하여 CO₂당량으로 환산하였다.

$$\text{Total GWP (g-CO}_2\text{/m}^2\text{)} = (310 \times \text{N}_2\text{O}) + (21 \times \text{CH}_4) + (1 \times \text{CO}_2)$$

통계 분석

통계 분석은 SAS 9.4 (SAS Institute Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였으며, Duncan's multiple range test (DMRT)를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의수준에서 처리간 효과를 분석하였다.

결과 및 고찰

토양 화학성 조사

바이오차 처리에 따른 봄배추 재배 후 토양의 화학성을 조사한 결과(Table 3), 토양 pH의 경우 2022년과 2023년에 각각 6.91-7.23 및 6.48-6.72으로 바이오차 처리량이 증가할수록 pH가 증가하였으며, 연용처리시 pH가 낮아져 배추 재배에 적정 pH인 6.0-6.5 범위로 개선되었다. Kang 등[14]의 연구에서 토양 pH와 CO₂ 배출량이 음의 상관관계를 나타낸다는 연구결과를 통해 바이오차 연용에 따른 뿌리 및 미생물활성으로 인한 CO₂ 배출량 증가로 인해 pH가 감소한 것으로 보여진다. 수확 후 토양 EC는 BC0와 비교하였을 때, 바이오차 처리에 따라 EC값이 34.1-49.3% 범위로 낮아졌으며, 연용처리시 EC값은 35.6-72.9% 감소하여 배추생육에 적정범위인 2.0 dS/m 이하까지 감소하였다. 일부 연구에서는 바이오차의 처리가 토양의 염분 및 나트륨을 증가시켜 토양 EC가 증가한다는 보고가 있으나[15,16], Wang 등[17]은 바이오차가 넓은 비표면적과 음전하로 인하여 pH가 6 이상일 때, 많은 양의 양이온을 흡착하여 EC가 낮아진다고 하였으며, Dahlawi 등[18]은 염류토양에서 바이오차의 처리는 나트륨과 같은 염을 흡착

시키거나 토양 물리성을 개선시켜 염의 침출을 증가시킴으로써 EC값이 낮아진다고 보고하였다. 이와 같이 바이오차로 인하여 토양 EC가 감소된 것으로 판단된다. T-C 및 T-N의 경우, 바이오차 처리에 따라 함량이 증가하였으나 연용에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다.

봄배추 재배기간 동안의 토양 무기태 질소는 Fig. 2에 나타내었다. 2022년 평균 암모니아태 질소와 질산태 질소 함량은 각각 99.4-179.8 mg/kg 및 161.0-335.0 mg/kg으로 바이오차 사용수준이 증가할수록 암모니아태 질소는 증가하였으며, 질산태 질소는 감소하였다. Kang 등[19]은 바이오차가 암모니아태 질소 흡착능력이 높은 물질이며, 바이오차 사용수준이 증가할수록 흡착능력은 증가한다고 하였다. 이와 같이 토양에 처리된 질소가 암모니아태 질소 형태로 바이오차에 흡착하여 용탈 및 질산화를 감소시킴으로써 암모니아태 질소가 증가하고 질산태 질소가 감소하였을 것으로 판단된다. 2023년 평균 암모니아태 질소와 질산태 질소 함량은 19.9-49.9 mg/kg 및 94.5-132.3 mg/kg으로 조사되었으며, 바이오차 연용처리 또한 바이오차 사용수준을 증가시킬수록 질산태 질소 함량이 감소한 것으로 조사되었다.

온실가스 배출량

2022년 및 2023년 봄배추 재배기간 동안 바이오차 사용에 따른 온실가스 배출량을 조사한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 바이오차 처리구별 평균 N₂O 배출량은 2022년 BC0, BC1, BC3 및 BC5에서 각각 0.39, 0.29, 0.23 및 0.18 mg/m²day였으며, 2023년은 각각 0.43, 0.40, 0.39 및 0.34 mg/m²day로 조사되었다. 바이오차 사용수준이 증가할수록 N₂O 배출량은 감소하였으나, 연용처리를 한 2023년도에 배출량은 전년도보다 증가한 것으로 조사되었다. 토양에서 N₂O 배출은 탈질 및 질산화과정으로 배출되며, 토양온도, 수분함량 및 무기태 질소함량 등 다양한 환경요인이 N₂O 배출에 영향을 준다[20]. 바이오차 사용수준 증가에 따른 N₂O 저감은 Liu 등[21]의 연구에서 보고한 바와 같이 바이오차로 인한 토양 pH 증가 및 질산화 및 탈질 유전자의 감소로 인하여 N₂O 배출량

Table 3. Chemical properties of soil cultivations

| | pH (1:5) | EC (dS/m) | T-C | T-N | Av. P ₂ O ₅ (mg/kg) | Ex. cation (cmol _c /kg) | | | | |
|------|-------------|--------------|----------------|--------|--|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | - - (g/kg) - - | | | | K | Ca | Mg | CEC |
| 2022 | BC0 | 6.91b | 4.26a | 27.2ns | 3.46ns | 951b | 1.10ns | 9.91ns | 1.77a | 17.2a |
| | BC1 | 6.76ab | 3.02ab | 29.2 | 3.70 | 1,051a | 0.96 | 10.92 | 1.90ab | 18.1ab |
| | BC3 | 7.07ab | 2.76ab | 32.4 | 4.22 | 1,051a | 1.06 | 10.55 | 1.96ab | 18.7ab |
| | BC5 | 7.23a | 2.32b | 33.2 | 4.02 | 1,053a | 1.10 | 10.84 | 1.86b | 18.2b |
| 2023 | BC0 | 6.48b | 2.95a | 27.5b | 3.01ns | 1013c | 1.21ns | 9.84b | 1.78ns | 17.0a |
| | BC1 | 6.50b | 2.66b | 30.2ab | 3.31 | 1085b | 1.15 | 10.11a | 1.96 | 15.8b |
| | BC3 | 6.72a | 1.68b | 32.1ab | 3.18 | 1017c | 1.18 | 10.27a | 1.88 | 16.6ab |
| | BC5 | 6.60ab | 1.24b | 34.0a | 3.17 | 1194a | 1.20 | 10.18a | 1.82 | 16.2ab |

[†]Different letters for each row showed a significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test. ns means not significant.

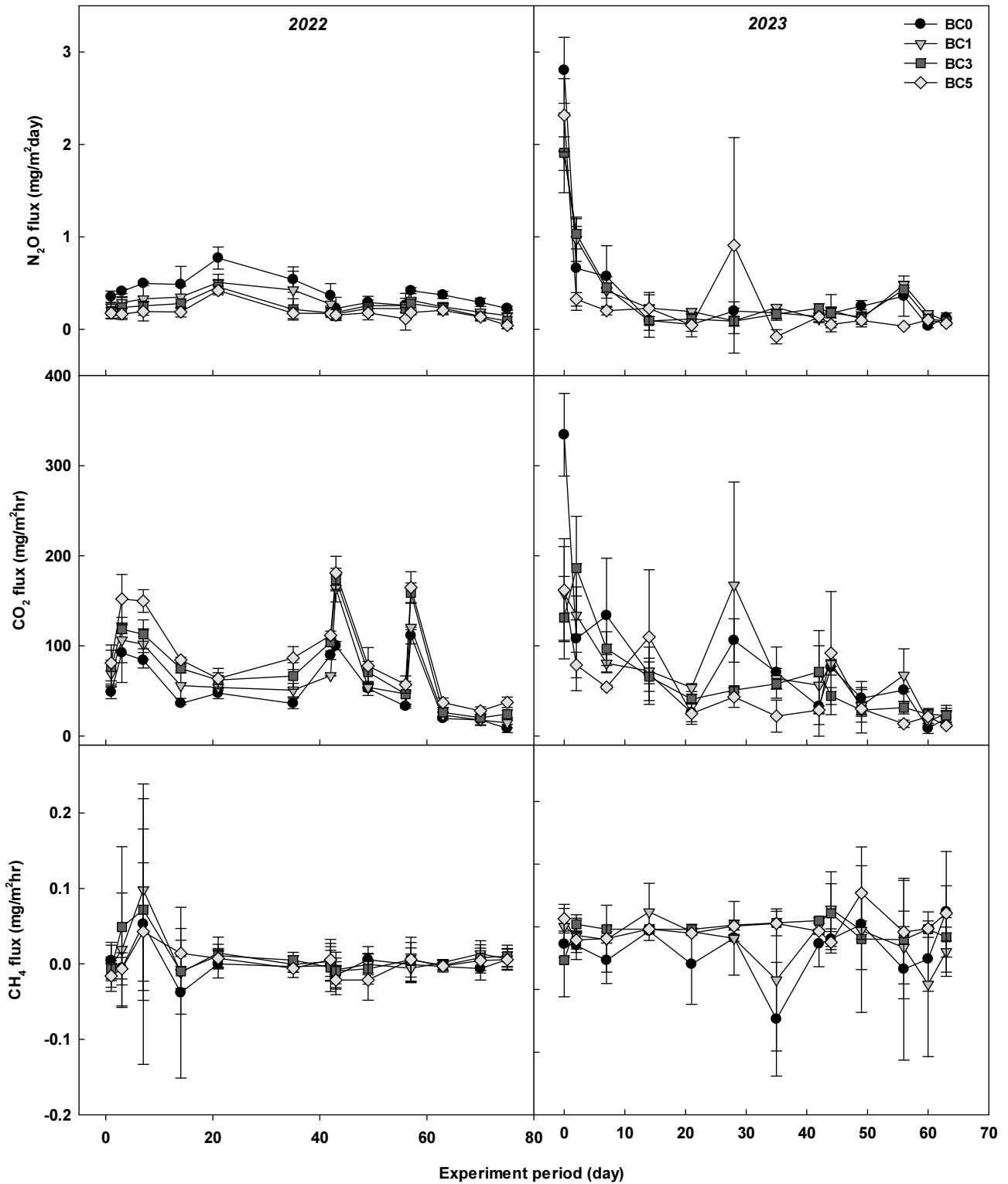


Fig. 2. Greenhouse gas emissions during spring cabbage cultivation period.

이 감소한 것으로 판단된다. 바이오차 연용처리에 따른 평균 N₂O 배출량 증가는 2022년도 봄배추 재배를 통해 토양 내 무기태 질소함량이 증가하였으며, 2023년도 배추재배 초기에 N₂O 로 배출되었을 것으로 판단된다[22].

바이오차 사용수준별 CO₂ 배출량은 BC0의 경우에 2022년

과 2023년에 각각 8.41-111.5 및 8.43-334.1 mg/m²hr 범위였으며, BC1, BC3, BC5 처리구에서는 각각 14.8-164.0 및 16.1-167.4 mg/m²hr, 20.3-173.7 및 22.8-186.4 mg/m²hr, 28.0-181.1 및 11.6-161.9 mg/m²hr 범위로 조사되었다. CO₂ 배출량은 시비 직후 크게 증가하다가 10일 이후 100 mg/m²

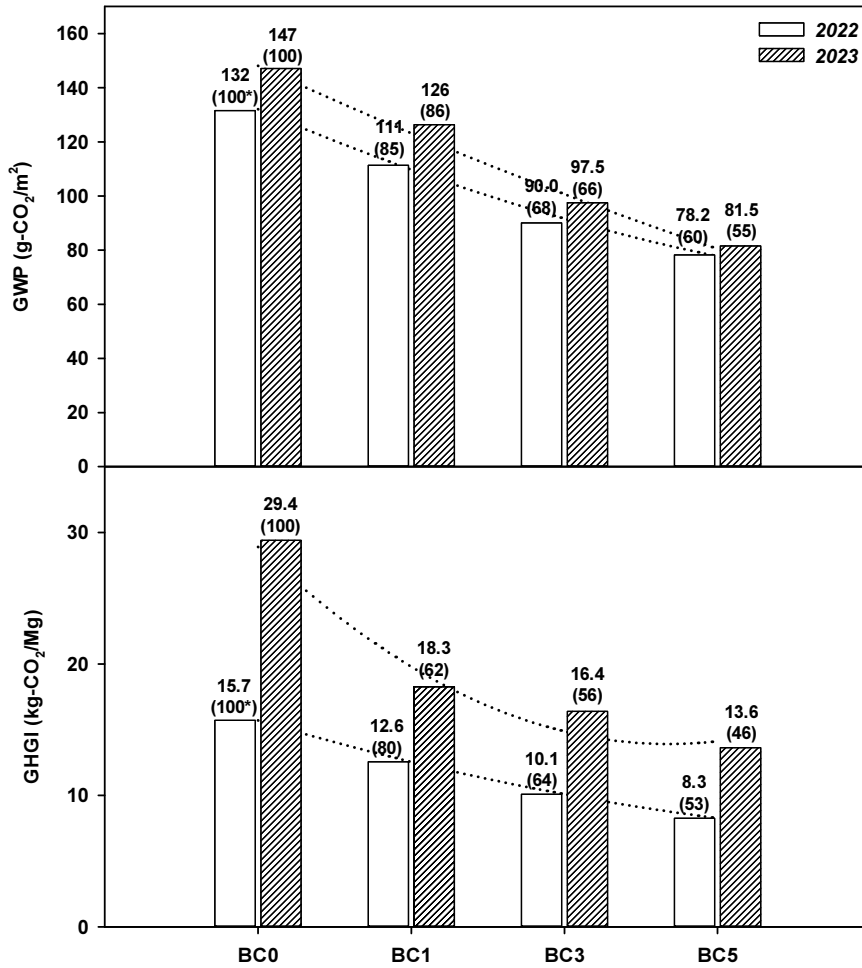


Fig. 3. Global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) under biochar application to cabbage cultivation for 2 years.

hr 이하로 낮아졌으며, 추비처리에 따라 CO₂ 배출량이 증가하였다. 2022년 CO₂ 배출량은 바이오차 시용수준이 증가할수록 CO₂ 배출량이 증가하였으며, 바이오차로 인해 미생물 활성이 증가하여 미생물 호흡량이 증가한 것은 CO₂ 배출량 증가에 원인인 것으로 판단된다[23]. 바이오차 연용처리시 CO₂ 배출량은 2022년보다 증가하였으나, 바이오차 시용수준에 따른 CO₂ 배출량은 2022년과는 상반되게 바이오차의 시용수준이 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 감소하였다. 이는 Lee[24]의 토양 유형별 바이오차 처리에 따라 CO₂ 배출을 저감한다는 연구결과와 유사하다고 판단된다. Lee 등[7]의 바이오차 투입에 따른 CO₂ 배출에 대한 메타 분석 연구결과에 따르면 바이오차 투입에 따른 CO₂ 배출량은 연구에 따라 상이하다고 하였으며, 이는 CO₂ 배출량에 대한 바이오차 효과가 다양한 환경적 요인에 영향을 받기 때문이라고 하였다.

배추 생육조사

바이오차 처리에 따른 배추의 생육은 엽장, 엽폭 및 생체량을 조사하여 생산량을 평가하였다(Table 4). 초기 바이오차를 처리하여 재배한 배추의 생중량, 엽장 및 엽폭은 2.18-2.41 kg/

plant, 44.4-46.9 cm 및 23.5-27.1 cm로 조사되었다. 봄배추의 생중량과 엽폭은 바이오차 시용수준이 증가함에 따라 증가하는 경향이었으나, 유의한 차이는 5 t/ha 이상 처리시 나타

Table 4. Growth characteristics of cabbage after harvest according to continuous use of rice husk biochar

| | | Fresh weight (kg/plant) | Leaf length (cm) | Leaf width (cm) |
|------|-----|-------------------------|------------------|-----------------|
| 2022 | BC0 | 2.18 b [†] | 44.4 ns | 23.9 b |
| | BC1 | 2.23 b | 46.6 | 24.0 b |
| | BC3 | 2.36 b | 46.1 | 23.5 b |
| | BC5 | 2.41 a | 46.9 | 27.1 a |
| 2023 | BC0 | 1.25 b | 17.7 ab | 11.5 ns |
| | BC1 | 1.73 a | 23.7 a | 15.9 |
| | BC3 | 1.49 b | 23.1 a | 14.8 |
| | BC5 | 1.50 b | 16.0 b | 11.4 |

[†]Different letters for each row showed a significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test. ns means not significant.

났다. 엽장은 바이오차 처리 간에 유의한 차이가 없는 것으로 조사되었다. 바이오차의 연용처리에 따른 봄배추의 생중량, 엽장 및 엽폭은 각각 1.25-1.73 kg/plant, 16.0-23.7 cm 및 11.4-15.9 cm 범위로 조사되었다. Jang 등[25]의 연구에 따르면 바이오차 처리에 의해 작물의 생육이 증가하였으나, 통계적인 차이가 나타나지 않았다는 연구결과와 유사한 결과를 보였다. 바이오차는 토양개량을 통해 작물 생육에 유리한 환경을 조성해 준다고 알려져 있으나, 바이오차 사용수준이 증가할수록 토양 pH가 배추 생육에 적합한 6.0-6.5 범위를 초과시켜 배추 생육에 부정적인 영향을 줄 수 있다[26]. 하지만 바이오차 연용처리에 따라 토양의 pH 및 EC가 배추 생육에 적합하게 개선되었으나, 바이오차를 처음 처리하였을 때보다 배추 생육이 저조하였다. 이는 탄소함량이 높은 바이오차의 연용으로 토양의 탄질비가 증가하였으며, 이에 따라 질소이용효율이 감소하였을 것으로 판단된다[27]. 또한 연용처리에 따른 배추 생육저하로 인해 배추재배기간이 단축되었으며, 이로 인하여 연용처리에서 배추 생육이 더욱 낮아진 것으로 판단된다[28].

GWP 및 GHGI

2022년과 2023년도의 바이오차 처리에 따른 총 온실가스 배출량은 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)와 배추의 수량당 온실가스 배출강도(Greenhouse gas intensity, GHGI)로 나타내었다(Fig. 4). 2022년 GWP는 78.2-132 g-CO₂/m²으로 조사되었으며, 바이오차를 처리한 BC1, BC3, BC5에서 각각 BC0대비 15, 32 및 40% 감소하였다. 2023년 GWP는 81.5-147 g-CO₂/m²으로 BC0대비 14, 34 및 45% 감소하였다. 바이오차 연용처리시 GWP가 더 높았으나, 바이오차 사용수준에 따른 GWP 저감효율은 증가하였다. Li 등[29]의 질소비료와 바이오차의 적용에 따른 지구온난화지수에 대한 연구에서 GWP의 감소는 pH, C/N, 토양통기성을 통한 N₂O 저감에서 기인되며, 바이오차 사용이 N₂O 배출량을 줄여주어 총 온실가스 배출량이 감소한 것으로 판단된다.

배추 단위수량당 온실가스 배출지수의 경우 2022년은 BC0에 비해 BC1, BC3 및 BC5에서 각각 20, 56 및 47% 감소하였으며, 2023년은 BC0 대비 38, 44 및 54% 감소하였다. 바이오차 사용에 대한 GHGI는 다양한 환경조건과 토양 및 바이오차의 특성에 따라 차이를 보이며, 본 연구의 경우에 2022년과 2023년에 바이오차를 처리하지 않은 BC0 처리구에서의 GHGI 차이(13.7 kg-CO₂/Mg)보다 바이오차를 연용한 처리구의 GHGI의 차이(5.3-6.3 kg-CO₂/Mg)가 더 낮은 것으로 보아 바이오차의 연용처리가 환경 및 경제적 효과가 있는 것으로 보여진다[30].

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (PJ015568022022)” Rural Development Administration, Republic of Korea. Moreover, This research was supported by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2021 RIS-002).

References

1. Son IS, Kim DK (2022) Evaluation of greenhouse gas reduction potential of the Korean green new deal: Focusing on the support programs of new and renewable energy deployment. *Journal of Climate Change Research*, 13(3), 325-338. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.3.325>.
2. Park KH, Oa SW, Kim SH, Kim KT (2022) A study on the carbon neutral effect and improvement of river water quality through non-point source pollution control in farmland. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 22(6), 25-31. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2022.22.6.25>.
3. Woo SH (2013) Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology*, 19(3), 201-211. <https://doi.org/10.7464/ksct.2013.19.3.201>.
4. Mosa A, Mansour MM, Soliman E, El-Ghamry A, El-Alfy M, El-Kenawy AM (2023) Biochar as a soil amendment for restraining greenhouse gases emission and improving soil carbon sink: current situation and ways forward. *Sustainability*, 15(2), 1206. <https://doi.org/10.3390/su15021206>.
5. Iboko MP, Dossou-Yovo ER, Obalum SE, Oraegbunam CJ, Diedhiou S, Brummer C, Teme N (2023) Paddy rice yield and greenhouse gas emissions: Any trade-off due to co-application of biochar and nitrogen fertilizer? A systematic review. *Heliyon*, 9(11), e22132. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22132>.
6. Gross CD, Bork EW, Carlyle CN, Chang SX (2022) Biochar and its manure-based feedstock have divergent effects on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in cropland. *Science of the Total Environment*, 806(3), 151337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151337>.
7. Lee SI, Kang SS, Choi EJ, Gwon HS, Lee HS, Lee JM, Lim SS, Choi WJ (2021) Soil carbon storage in upland soils by biochar application in East Asia: Review and

- data analysis. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(3), 219-230.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.26>.
8. Lee SI, Kim GY, Choi EJ, Lee JS, Gwon HS, Shin JD (2020) Effect of biochar application on nitrous oxide emission in the soil with different type of nitrogen fertilizer during corn (*Zea mays*) cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 39(4), 297-304.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2020.39.4.35>.
 9. Alkharabsheh HM, Seleiman MF, Battaglia ML, Shami A, Jalal RS, Alhammad BA, Almutairi KF, Al-Saif AM (2021) Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A Review. *Agronomy*, 11(5), 993.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>.
 10. Tomczyk A, Sokolowska Z, Boguta P (2020) Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Review in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191-215.
<https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
 11. Xiang L, Liu S, Ye S, Yang H, Song B, Qin F, Shen M, Tan C, Zeng G, Tan X (2021) Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials*, 420(15), 126611.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>.
 12. Wang H, Nan Q, Waqas M, Wu W (2022) Stability of biochar in mineral soils: Assessment methods, influencing factors and potential problems. *Science of the Total Environment*, 806, 150789.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150789>.
 13. Heo DY, Hong CO (2019) Effect of weathering of bottom ash on mitigation of greenhouse gases emission from upland soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 38(4), 245-253.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2019.38.4.33>.
 14. Kang DH, Kwon BH, Kim PG (2010) CO₂ respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon bay. *Journal of the Environmental Science*, 19(2), 217-227.
 15. Lim JE, Lee SS, Ok YS (2015) Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metals in contaminated soil. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 58(1), 39-50.
<http://dx.doi.org/10.3839/jabc.2015.008>.
 16. Zang Y, Idowu OJ, Brewer CE (2016) Using agricultural residue biochar to improve soil quality of desert soils. *Agriculture*, 6(1), 10.
<https://doi.org/10.3390/agriculture6010010>.
 17. Wang F, Wang X, Song N (2021) Biochar and vermicompost improve the soil properties and the yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth in plastic shed soil continuously cropped for different years. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 315, 107425. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107425>.
 18. Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, Naidu R (2018) Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.257>.
 19. Kang YG, Lee JH, Chun JH, Oh TK (2021) Adsorption characteristics of NH₄⁺ by biochar derived from rice and maize residue. *Korean Journal of Environment Agriculture*, 40(3), 161-168.
<https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.19>.
 20. Kim GY, So KH, Jeong HC, Shim KM, Lee SB, Lee DB (2010) Evaluation of N₂O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in red pepper and soybean field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(6), 880-885.
 21. Liu L, Shen G, Sun M, Cao X, Shang G, Chen P (2014) Effect of biochar on nitrous oxide emission and its potential mechanisms. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(8), 894-902.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2014.899937>.
 22. Choi HJ, Seo SY, Choi SW, Lee CK, An MS, Yun SI (2022) Crop growth and nitrous emission in red pepper soils: Effects of chemical fertilizer and livestock manure compost treatments. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 55(2), 162-174.
<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.2.162>.
 23. Wang Q, Yuan J, Yang X, Han X, Lan Y, Cao D, Sun Q, Cui X, Meng J, Chen W (2022) Responses of soil respiration and C sequestration efficiency to biochar amendment in maize field of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 233, 105442.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105442>.
 24. Lee JM, Park DG, Kang SS, Choi EJ, Gwon HS, Lee HS, Lee SI (2021) Greenhouse gas emissions according to application of biochar by soil type in the closed chamber. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(4), 451-466.
<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.4.451>.
 25. Jang JE, Lim SH, Shin MW, Moon JY, Nam JH, Lim GJ (2023) Effects of applied biochar derived from spent oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) substrate to soil physico-chemical properties and crop growth responses. *Journal of the Korea Organic Resources*

- Recycling Association, 31(3), 73-82.
<https://doi.org/10.17137/korrae.2023.31.3.73>.
26. Oh TK, Lee JH, Kim SH, Lee HC (2017) Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage. *Korean Journal of Agriculture Science*, 44(3), 359-365. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170039>.
27. Cho JR, Choi HS, Lee Y, Lee SM, Jung SK (2012) Effect of organic materials on growth and nitrogen use efficiency of rice in paddy. *Korean Journal of Organic Agriculture*, 20(2), 211-220.
28. Lee SM, Koo JY, Jeon BT (1995) The effect of cultivation period on growth characteristics, palatability and forage yield of soybean cultivars. *Journal of the Korean Society of Grassland Science*, 15(2), 132-139.
29. Li B, Fan CH, Zhang H, Chen ZZ, Sim LY, Xiong ZQ (2015) Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmospheric Environment*, 100, 10-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.034>.
30. Liu X, Mao P, Li L, Ma J (2019) Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 656, 969-976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.396>.