

미생물 접종 바이오차 펠릿을 이용한 배추 뿌리혹병 방제 및 온실가스 저감 효과

남주희^{1*}, 문지영², 신중두³, 심창기⁴, 김민정⁵

Control of Clubroot Disease (*Plasmodiophora brassicae*) and Greenhouse Gas Reduction Effect in Kimchi Cabbage Using Microbial Biochar Pellets

Joo-Hee Nam , Ji-Young Moon , Joung-Du Shin , Chang-Ki Shim  and Min-Jeong Kim 

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원예연구소, ²경기도농업기술원 친환경미생물연구소, ³다학박바이오텍, ⁴농촌진흥청 국립농업과학원 기술지원과, ⁵농촌진흥청 국립과학원 유기농업과

¹Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman, 52054, Korea, ²Environment-Friendly Microorganism Research Institute, Gyeonggi-Do Agricultural Research and Extension Service, Gwangju, 12805, Korea, ³Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co., Wanju, 55315, Korea, ⁴Technology Services, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Korea, ⁵Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Korea

* Correspondence: greendaily@korea.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.29>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 275-286

Received: June 24, 2025

Revised: July 29, 2025

Accepted: August 22, 2025

Published: August 29, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



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.

Abstract: This study aimed to evaluate the control efficacy of clubroot disease in Kimchi cabbage and carbon sequestration by applying microbial biochar pellets inoculated with antagonistic microorganisms. The microbial biochar pellets were prepared by mixing rice husk biochar and guano at a 6:4 ratio, followed by inoculation with collected antagonistic strains against clubroot disease, adjusting to a viable cell density above 1.0×10^7 CFU·mL⁻¹ and a total nitrogen content of 6%. Treatments included a non-treated control, biochar alone, and biochar pellets inoculated with *Pseudomonas fluorescens* (RBPM27) or *Bacillus megaterium* (RBPM86). Before transplanting Kimchi cabbage in the spring trial field, each material was evenly mixed into the soil, and greenhouse gas samplings such as CH₄ and N₂O were analyzed at 7 day intervals during the growing period. Clubroot incidence was evaluated 50 days after transplanting. The RBPM86 treatment significantly reduced the incidence rate of clubroot by 31.8%, showing the highest control efficacy of 57.7%. The RBPM27 and RBPM86 treatment significantly reduced the cumulative emissions of CH₄ and N₂O by 69% and 29%, respectively, relative to the control, indicating its potential for greenhouse gas mitigation. These results suggest that microbial biochar pellets inoculated with effective antagonistic microorganisms offer a promising strategy for managing clubroot disease and mitigating greenhouse gas emissions in Kimchi cabbage cultivation.

Keywords: Carrier, Clubroot, Greenhouse gas mitigation, Microbial community, Micro-organism

서 언

최근 기후 변화로 여름철 폭염이 지속되고, 9월까지 고온 다습한 환경이 이어지면서 서늘한 기후에서 재배하는 채소 작물의 피해가 심각해지고 있다. 이러한 현상은 지구온난화에 기인하는데, 지구온난화는 지표 부근 대기와 해양의 평균 온도가 장기적으로 상승하는 현상으로 정의된다. 우리나라의 경우, 1912년 이후 2017년까지 평균 기온이 1.8°C 상승하였고[1], 지구의 온도 상승은 대기 중 이산화탄소 농도 증가와 밀접하게 일치하며, 이산화탄소(CO₂)는 대표적인 온실가스로 확인되었다[2]. 이에 따라 농업분야 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)는 주요 온실가스를 저감하기 위한 노력이 강화되고 있다. 국제사회는 파리협정(Conference of the Parties; COP, 2015)을 통해 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승 폭을 2°C 이내로 제한하고, 추가적으로 1.5°C 이내로 억제하기 위해 2050년까지 탄소중립 달성을 목표로 설정하였다. 우리나라 농·축산업에서는 농림축산식품부 탄소중립 추진전략에서 온실가스 감축 로드맵은 2030년까지 585.8만 톤CO₂-eq, 2050년까지 824.3만 톤CO₂-eq를 각각 감축해야 한다.

배추, 양배추와 같이 서늘한 기후에서 주로 재배되는 작물은 기후변화로 온도가 상승하여 생육기에 고온이 지속될 경우 결구 불량뿐만 아니라, 고온 다습한 환경에서 주로 발생하는 무름병(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*)과 뿌리혹병(*Plasmodiophora brassicae*) 등 주요 병해 및 해충 피해로 인해 수량 감소와 상품성 저하가 심각해진다[3]. 뿌리혹병은 주로 토양 수분이 높고 pH 7.2 이하의 산성 토양에서 발생하는 난방제 병해로, 국내 고랭지 배추 주산지에서는 1996년 6.5 ha에서 2005년 692 ha로 발생면적이 급격히 증가하였다. 이후 화학농약 사용과 저항성 품종 개발로 2008년 264 ha까지 감소하였으나, 병원균 레이스의 다양화와 약제 저항성 문제[4]로 여전히 심각한 병해로 남아 있으며, 최근 폭염과 강우 빈도 증가로 발생이 다시 늘어나고 있다. 특히, 친환경 농업에서는 화학농약 사용이 제한되어 있어 뿌리혹병은 가장 큰 위협요소 중 하나이다. 이를 해결하기 위해 저항성 품종 이용[5], *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. 등 유용 미생물을 활용한 생물학적 방제, 감자·양파·콩과 같은 윤작 작물 재배를 통한 경종적 방제법[4], 온도, 토양 pH 개선 등을 통한 유채 뿌리혹병 방제기술 등의 다양한 방법이 제시되었다[6]. 현재 친환경 농가에서는 주로 유기농업자재와 생물학적 방제법을 활용하고 있으나, 토양 환경에서는 미생물 활성이 저하되어 관주 처리만으로는 방제 효과가 제한된다는 문제가 보고되었다[7]. 이에 따라, 유용한 기능적 특성을 가진 미생물의 특성을 유지·증진시키기 위하여 담체(carrier) 기반 기술 개발이 필요하게 되었다.

본 연구에 사용된 바이오차는 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로, 바이오매스를 산소가 없는 조건에서 열분해하여 얻은 물질이다. 바이오차는 다공성과 표면적이 넓은 특성을 지니며, 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)로부터 토양 개량과 탄소 격리 기능을 인정받아 온실가스 감축 및 탄소 저장 기술로도 주목받고 있다[8,9]. 이러한 특성으로 바이오차는 유기물 및 유용 미생물의 담체로서 활용 가능성이 높을 뿐만 아니라 농업적 측면에서 온실가스를 저감할 수 있는 소재로서 가치가 높다[10].

따라서 본 연구에서는 뿌리혹병에 대한 길항력이 우수한 미생물과 유기물을 바이오차에 접종하여 제조한 바이오차 펠렛을 토양에 혼화 처리함으로써, 미생물 활성이 불리한 토양 환경에서 미생물의 활성을 증진시키고 뿌리혹병 방제 효과를 검증하며, 동시에 온실가스 저감량을 산정하고자 하였다.

재료 및 방법

미생물 바이오차 펠렛의 제조

본 연구는 바이오차에 뿌리혹병 방제 효과가 있는 미생물을 접종하여 미생물 바이오차 펠렛을 제조하고 시험에 사용하였다. 미생물은 경기도농업기술원 친환경미생물연구소에서 경기도 파주시 배추 재배 토양으로부터 분리하여 포트검정에서 선발한 길항미생물로 16S rRNA gene sequencing을 통해 획득한 염기서열을 NCBI GenBank 데이터베이스와 비교 분석하여 미생물을 최종 동정하였다.

구아노와 왕겨 바이오차를 6:4의 비율로 혼합한 뒤 미생물을 접종하여 펠렛화하였으며, 총 질소 함량이 6%가 되도록 미생물 바이오차 펠렛 2종(RBPM27, RBPM86)을 제조하였다.

미생물 배양액을 접종한 뒤 생균수는 표준 평판 도말법을 이용하여 확인하였다. 미생물 바이오차 펠렛 10 g을 멸균 생리식염수(0.85% NaCl) 90mL에 현탁하여 10배씩 희석한 후 희석액을 선택배지(Tryptic Soy Agar, TSA)에 도말하고 28°C에서 48시간 배양하였다. 배양 후 생성된 집락 수를 계수하여 접종된 미생물의 생존 여부 및 생균수(Colony Forming Units, CFU)를 확인하였다.

재배환경 및 시험토양 특성

본 연구는 경기도 광주시 곤지암읍에 위치한 경기도농업기술원 친환경미생물연구소 뿌리혹병 이병포장(위도: 37.351681°, 경도: 127.322786°)에서 수행되었으며, 시험에 사용된 봄 배추 품종은 뿌리혹병 감수성 품종인 ‘황금노랑배추’를 사용하였다. 2024년 4월 11일에 60 × 40 cm 간격으로 정식하여 6월 11일까지 60일간 재배하였고, 생육기간 중 기상환경은 평균 기온 19.1°C, 평균 습도 51.0%였다(Table 1). 시험구는 세구배치법(Split-Plot Design)으로 3반복 수행하였고, 배추 정식 전 재배포장의 표토(0~20 cm)를 채취하여 토양 특성을 확인하였다. 정식 전 발토양의 pH는 6.8, 전기전도도(EC)는 2.12 dS·m⁻¹, 유기물(OM) 함량은 26 g·kg⁻¹, 유효인산(P₂O₅)은 767 mg·kg⁻¹, 질산태질소(NO₃⁻-N)는 67.20 mg·kg⁻¹이었으며, 치환성 칼륨(K⁺), 칼슘(Ca²⁺), 마그네슘(Mg²⁺), 나트륨(Na⁺) 함량은 각각 1.28, 5.93, 1.78, 0.26 cmol_c·kg⁻¹으로 분석되었다(Table 2).

Table 1. Air temperature and relative humidity during the growth period of Kimchi cabbage

Temperature (°C)			Humidity (RH, %)		
Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum
5.7	19.1	31.8	27.1	51.0	84.2

Table 2. The Chemical properties of the soil before transplanting

pH	EC	O.M	P ₂ O ₅	NO ₃ ⁻ -N	K	Ca	Mg	Na
1:5	dS·m ⁻¹	g·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹			cmol _c ·kg ⁻¹		
6.8	2.12	26	767	67.20	1.28	5.93	1.78	0.15

배추 지상부 생육특성 및 수량 조사

본 시험의 처리내용은 대조구, 바이오차만 혼화처리한 처리구, *P. fluorescens*를 접종한 미생물 바이오차 펠렛 처리구(RBPM 27), *B. megaterium*를 접종한 미생물 바이오차 펠렛 처리구(RBPM86)로 수행되었다.

유기물이 포함된 미생물 바이오차 펠렛 처리구는 농촌진흥청 작물별 비료사용처방에 준하여 노지 배추 재배 시 생육 전 기간 필요한 질소 추천 시비량인 32 kg·10a⁻¹ 기준으로 산정하여 정식 전 토양 혼화처리하였으며 무처리, 바이오차 처리구의 경우에 정식 45일에 준비하였다. 생육조사는 농촌진흥청 시험연구조사기준에 준하여 수확 시 배추 지상부의 구고, 구폭, 구중을 조사하였고, 수량은 각 처리구에서 3 × 3 m² 면적 내 배추를 수확하여 조사된 무게를 단위면적 당 수량으로 환산하였다[11].

발병조사

봄 배추 정식 후 40일 차, 수확 시 시험구별 발병주율을 조사하였고, 수확기에 뿌리를 뽑아 발병주율과 발병 정도를 Kim et al.(2009)의 방법을 일부 변형하여 수행하였다. 0~5까지 6단계(0: 무발병, 1: 측근에 뿌리혹 착생, 독립하여 작게 존재, 2: 측근 뿌리혹 착생 및 크기가 비교적 큼, 3: 주근 뿌리혹 착생 4: 주근 뿌리혹 착생 및 여러 혹이 서로 접촉되고 크기가 큼, 5: 주근 뿌리혹 착생 및 크기에 매우 큼)로 등급화하여 발병도 Disease severity (%) = (Σ (각 지수 × 해당 지수의 주수)) ÷ (조사주수 × 5) × 100을 구하였고, 방제가는 ‘식 (1)’과 같다.

$$\text{방제가}(\%) = (1 - \text{처리구의 발병지수} / \text{무처리구의 발병지수}) \times 100 \quad (1)$$

배추 근권부 토양 미생물 군집 분석

미생물 바이오차 펠렛 처리 후 뿌리혹병 방제 효과가 있는 처리구에서 배추 근권부에 접종한 균주의 정착 유무와 무처리, 대조구와 비교하여 처리구에서 근권부 군집 변화가 있는지 확인하고자 배추 근권부 군집 분석을 수행하였다. 시료는 정식 전 토양과 봄 배추 정식 후 14일 차, 수확 시 배추 근권 토양을 채취하였으며, 근권부 토양은 배추를 뿌리째 뽑은 뒤 뿌리가 없는 토양층을 잘라낸 후 근권부 토양을 터는 방법으로 채취하여 분석하였다. DNA 추출은 DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Germany)

를 이용하여 수행하였으며, 16S rRNA 내 V3-V4 영역 증폭에 341F (5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3') 및 805R (5'-GACTAC HVGGGTATCTAATCC-3') 프라이머를 사용하였다. PCR 증폭 후, Illumina MiSeq 플랫폼(Illumina, USA)을 이용하여 paired-end (2×300bp)로 차세대 염기서열 분석(Next-Generation Sequencing, NGS)을 수행하였다. 염기서열 유사성을 기준으로 operational taxonomic units (OTUs)을 분류하고 분석하였다. 세균 분류는 SILVA 138database를 참조하여 동정하였으며, 각 처리구별 상대적 풍부도를 분석하여 미생물 바이오차 펠렛 처리별 배추 근권부 토양 미생물 군집을 Phylum 수준에서 구성의 변화를 비교하였다.

온실가스 분석

배추 시험포장에 설치된 온실가스 포집 챔버(Fig. 1)를 통하여 CH₄와 N₂O 농도를 측정하기 위해 가스 포집은 일주일 간격으로 챔버를 고정시켜 1시간 동안 채류시킨 후, 50 mL 주사기를 이용하여 가스를 포집하였으며, 챔버 내의 온도는 온실가스 포집 전후로 1시간 간격으로 측정하였다(Fig. 1).

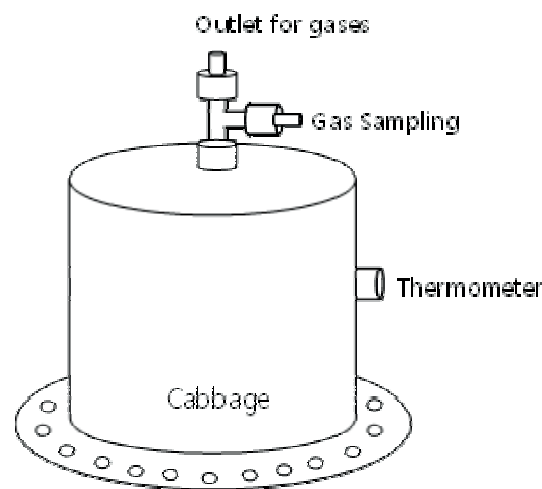


Fig. 1. Diagram of greenhouse gas sampling chamber.

가스 농도는 Gas Chromatography (Agilent 7890B, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 분석하였으며, CH₄와 N₂O의 발생량 산정은 아래와 같은 식 (2)를 이용하였다[12].

$$F = (\rho \times V \times \Delta c) / ((\Delta t \times 273) / (T + 273)) \quad (2)$$

여기서, F 는 CH₄ 및 N₂O 농도(mg·m⁻²·h⁻¹), ρ 는 가스 밀도(mg·L⁻¹)로서 CH₄는 0.714, N₂O는 1.967, V 는 챔버 부피(m³), $\Delta c/\Delta t$ 는 챔버 내의 단위 시간당 가스 농도(mg·m⁻³·day⁻¹), 그리고 T 는 절대온도(273+챔버 내 평균 온도)를 의미한다.

통계분석

배추 생육조사는 각 처리당 3반복으로 수행하였고, 발병조사 시에는 처리구별 전수조사하였다. 통계분석은 SAS 프로그램 (SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)으로 분석하였다.

결과 및 고찰

미생물 바이오차 펠렛의 특성

미생물 바이오차 펠렛 접종원으로 사용된 미생물 2종은 *B. megaterium* 22BCO086, *P. fluorescens* 22BCO027로 동정되었다 (Fig. 2).

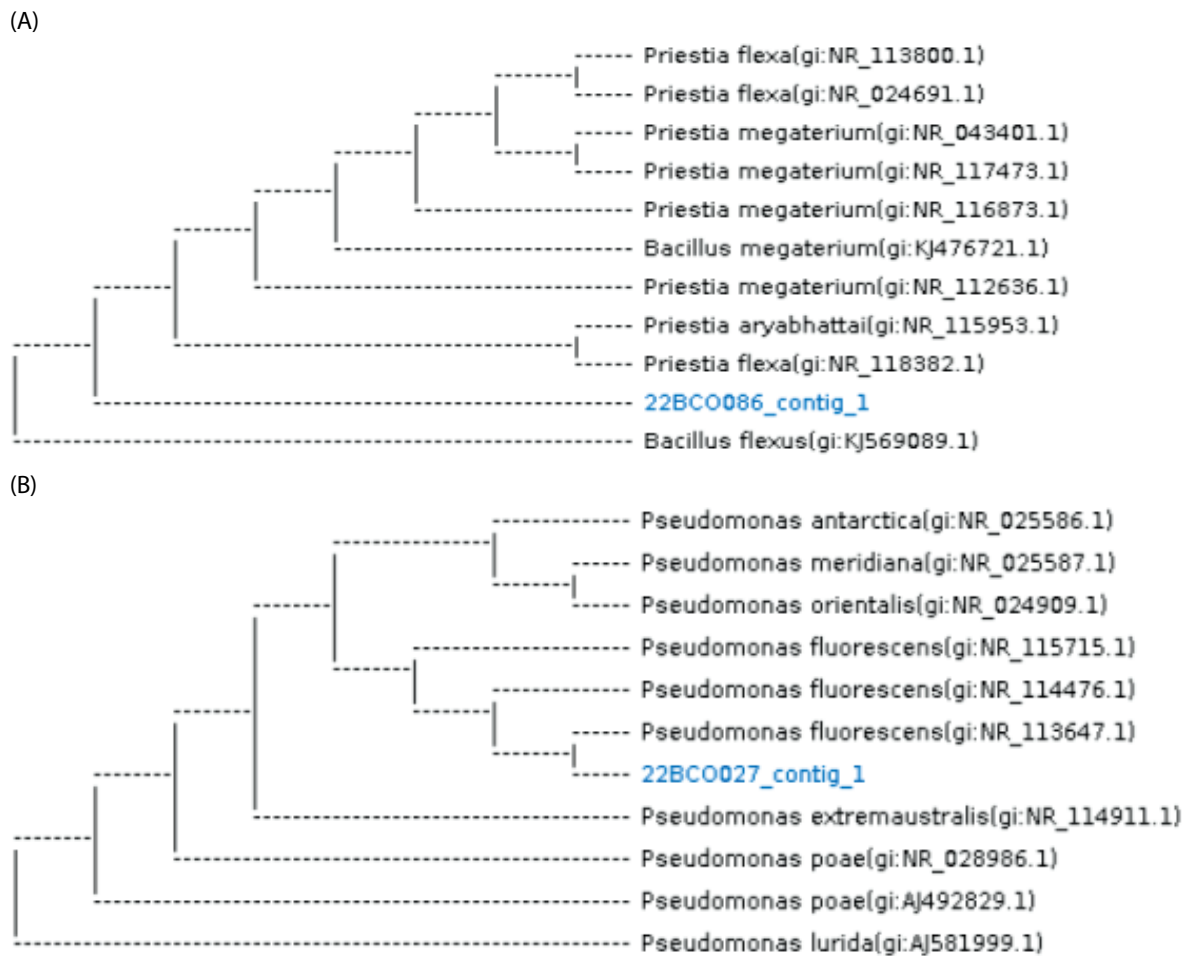


Fig. 2. Identification of *Bacillus megaterium* 22BCO086 (A) and *Pseudomonas fluorescens* 22BCO027 (B).

*Bacillus*와 *Pseudomonas* 속 세균을 이용한 생물적 방제에 관한 연구는 많이 보고되어 있고, 특히 항생물질 생산이 항균력과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으나[13], 선발된 미생물을 담체 소재에 접종 후 뿌리혹병 방제효과를 검증한 연구에 대한 정보는 미비한 실정이다. 미생물 바이오차 펠렛은 제조 후 미생물 접종 유무를 판단하기 위하여 생균수를 확인하고, 화학성을 분석하였다. 탄소와 질소 함량 분석 결과 RBPM27 처리구의 탄소 함량은 36.03%, 질소 함량은 6.01%였으며, RBPM86 처리구의 탄소 함량은 36.06%, 질소 함량은 6.05%로 분석되었다(Table 3). 펠렛 내 생균수는 RBPM27은 8.0×10^7 CFU·g⁻¹이었고, RBPM86은 1.1×10^7 CFU·g⁻¹으로 접종 후 유지되는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 미생물 담체 소재로 바이오차를 활용할 경우 균주 생균수와 작물 생육에 필요한 양분을 안정적으로 포함할 수 있는 가능성을 시사한다.

Table 3. Carbon and nitrogen contents, and microbial density of the experimental materials

Treatment	Carbon (%)	Nitrogen (%)	Selected microbial density (CFU·g ⁻¹)
Control	16.57	13.76	-
Biochar	29.80	0.51	-
RBPM27	36.03	5.94	8.0×10^7
RBPM86	36.06	6.17	1.1×10^7

시험 토양 화학성 분석

봄 배추 재배 시 미생물 바이오차 펠릿 처리에 따른 토양 화학성 분석 결과는 Table 4에 제시하였다. 정식 후 처리별 토양 pH는 바이오차, RBPM27, RBPM86에서 모두 7.0 이상으로 무처리구 대비 증가하는 경향을 보였다. 전기전도도(EC)는 전체적으로 감소하는 경향이었으나, 바이오차 처리구($1.77 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)와 RBPM27 처리구($2.05 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)에서는 무처리구에 비해 높은 값을 나타냈다.

Table 4. The Chemical properties of used soil in this experimental soil

Treatment	pH	EC	O.M	P ₂ O ₅	NO ₃ ⁻ -N	K	Ca	Mg	Na
	1:5	dS·m ⁻¹	g·kg ⁻¹	-----	mg·kg ⁻¹ -----	-----	cmol _c ·kg ⁻¹ -----	-----	-----
Control	6.7	1.33	21	743	78.50	1.16	5.39	1.58	0.35
Biochar	8.0	1.77	27	882	36.50	1.08	5.46	1.62	0.27
RBPM27	7.7	2.05	30	892	55.30	1.17	6.47	1.79	0.35
RBPM86	7.1	0.80	23	311	35.50	0.58	5.32	1.51	0.19

이러한 결과는 Chintala 등(2014)이 보고한 ‘옥수수 줄기 및 스위치그래스 바이오차 처리 시 토양 pH 및 EC가 증가하는 경향이 있다’는 연구 결과와 일치하였다[14].

특히, RBPM86 처리구에서는 수확 후 질산태질소(NO₃⁻-N) 농도가 $121 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 전기전도도가 $0.80 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 가장 낮게 나타났는데, 이는 바이오차 펠릿에 접종된 *B. megaterium* 22BCO086 균주의 활성에 의해 질산염 고정 또는 이용이 촉진되었을 가능성을 시사하며, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

배추 지상부 생육특성 및 수량 조사

미생물 바이오차 펠릿 처리에 따른 배추 지상부 생육특성과 수량 조사 결과는 Table 5와 같다. 구폭은 처리구 간 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 구중은 RBPM86에서 $1,843 \text{ g}$ 으로 통계적으로 유의하게 높았으며, 바이오차 처리구에서는 차이는 없었다. 수량 또한 RBPM86 처리구에서 $7,596 \text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 생체중과 비슷한 경향을 보였다. 이는 미생물 바이오차 펠릿 제조 시 혼합된 유기물과 *B. megaterium* 22BCO086의 효과에 기인한 것으로 판단된다.

Table 5. Growth and yield characteristics of Kimchi cabbage(*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*) in plots treated with microbial biochar pellet

Treatment	Head height(cm)		Head Width(cm)		Fresh weight(g)		Yield(kg/10a)	
Control	23.0	- ^x	14.54	-	1,656	b	6,824	b
Biochar	23.7	- ^x	14.60	-	1,754	a	7,227	a
RBPM27	23.2	- ^x	13.40	-	1,658	ab	6,832	ab
RBPM86	23.9	- ^x	13.80	-	1,843	a	7,596	a

x Mean Separation within columns by Duncan's multiple range test at $p\leq 0.05$.

선행 연구에 따르면, *B. megaterium* CDK25 균주 처리 시 고추에서 조섬유, 조단백질, 회분 함량이 증가하였으며[15], 토양 내 불용성 인산염을 가용화하여 식물에 인산을 공급하고, 유기물 분해를 통한 양분 공급을 촉진하여 작물 생육을 향상시키는 것으로 보고된 바 있어[16], 이러한 결과는 본 연구에서 관찰된 배추 생육 증진 효과와 일치하는 것으로 판단된다.

발병조사

미생물 바이오차 펠릿 처리가 배추 뿌리혹병 방제효과가 있는지 확인하기 위해 발병주율과 발병도를 조사하였다(Table 6). 뿌리혹병 이병토를 접종한 포장에서 휴면포자 밀도는 1.0×10^4 spores·g⁻¹ soil이었고, 무처리구 발병주율은 69.7%로 확인되었다. 뿌리혹병 발병주율은 바이오차 56.1% > RBPM27에서 54.5% > RBPM86 37.9% 순으로 미생물 바이오차 펠릿 처리시 발병주율이 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

Table 6. Clubroot disease incidence and severity in Kimchi cabbage in plots treated with microbial biochar pellets

Treatment	Diseased plant (%)	Disease Incidence Index						Disease severity (%)
		0	1	2	3	4	5	
Control	69.7	20	5	1	7	8	25	54.5
Biochar	56.1	29	5	4	3	3	22	42.3
RBPM27	54.5	35	5	8	5	5	8	37.4
RBPM86	37.9	40	9	8	5	0	4	23.1

특히, RBPM86 처리구는 무처리구 대비 발병주율이 31.8% 감소하였으며, 발병지수 조사에서도 유의한 차이를 보였다. 무처리구에서는 발병된 개체 중 주근에 크고 심한 혹이 착생하는 5등급이 전체 발병주 중 37.8%를 차지했으나, RBPM86 처리구에서는 5등급 비율이 6.1%로 크게 낮아졌다. 또한, RBPM86 처리구에서는 주근 전체에 심한 혹이 착생하는 경우보다 세근에 뿌리혹이 일부 착생하는 경미한 증상이 더 많이 관찰되었으며, 발병주율과 발병도를 기준으로 방제가를 산정한 결과 57.7% 뿌리혹병 방제 효과가 있는 것으로 조사되었다(Figs. 3 and 4).



Fig. 3. Clubroot disease severity in plots treated with microbial biochar pellet(CT: Control, T1: Biochar, T2: RBPM27, T3: RBPM86).

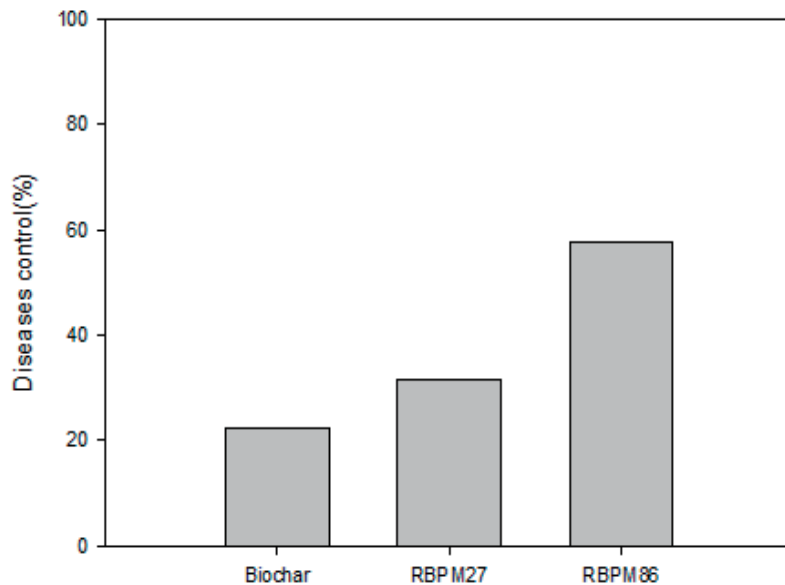


Fig. 4. Clubroot disease control efficacy with different treatments.

이러한 결과는 바이오차에 접종된 미생물의 효과에 기인한 것으로 판단된다. 선행 연구에서도 *Bacillus* 속 미생물이 항생물질 생산, 질병 저항성 유도, 병원균과의 공간 및 영양 경쟁을 통해 다양한 식물병을 억제하는 효과를 나타낸다고 보고된 바 있다[17].

따라서 본 연구에서 *B. megaterium*을 접종한 미생물 바이오차 펠렛(RBPM86)은 뿌리혹병 발병 억제에 효과적인 소재로 활용될 가능성이 높으며, 향후 다양한 병해에 대한 확대 적용 또한 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

배추 근권부 토양 미생물 군집 분석

배추 근권부 토양 미생물 군집 변화를 문(phylum) 수준에서 상대적 풍부도를 비교한 결과 토양 처리 조건에 따라 군집 구조에 변화를 확인할 수 있었다(Fig. 5). 배추가 심겨진 무처리 근권부 토양(S1)에서는 Pseudomonadota 34.5%, Acidobacteriota 26.2%, Bacillota 7.9%가 주요 우점군으로 확인되었다. 특히, 미생물 바이오차 펠렛 처리에서는 Bacteriota의 상대풍부도가 모두 크게 증가하는 경향이었다. 주요 우점군이 급격히 변화한 이유는 바이오차 펠렛 내 접종된 미생물을 영향인 것으로 판단된다. von Ageton 등(2018)은 친환경적인 토양 소독 방법 처리 처리에 따른 미생물 군집 분석 결과 Proteobacteria 문과 Firmicutes 문 수준의 특정 그룹이 증가하는 것을 확인하였으며, 병원균 억제에 효과적인 휘발성 화합물이 증가하여 이러한 군집 환경 변화가 특정한 식물 병원균을 억제할 수 있도록 기인하였을 것이라고 보고하였다. 또한, Liu 등(2021)은 Proteobacteria 문이 사막 토양 생태계에서 양분 순환과 다양한 효소 활성 향상에도 중요한 역할을 하고, 이러한 특정 미생물군의 증가가 식물 병원균 억제에 관련될 수 있다는 결과를 도출한 바 있다[18].

배추 근권부 토양 미생물 군집 분석 결과 미생물 바이오차 펠렛 처리구에서 무처리, 대조구와 비교하여 Bacteriota 비율이 증가한 것이 뿌리혹병 억제와 관련이 있을 가능성을 시사하지만, 동시에 다양한 생리적, 생태적 변화에 기인할 가능성도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

추가적으로 배추 근권부 미생물 군집에 대한 종 수준 분석을 위한 히트맵 분석 결과는 Fig. 6에 나타내었다. *B. megaterium*과 *P. fluorescens*를 각각 접종한 미생물 바이오차 펠렛 처리에 따른 군주의 존재 여부를 확인하였다. 종 수준에서 히트맵을 분석한 결과 *B. megaterium*은 우점적인 분포를 보이지 않았고, 근권부에서 확인되지 않았다. RBPM27 처리구에서는 *Pseudomonas* sp.의 상대적 풍부도가 다른 처리구에 비해 높게 나타났으나 접종한 군주는 $2.8 \times 10^1 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 로 비우점적이나 근권부에서 확인이 가능한 수준이었다. 배추 근권부 토양 미생물 군집 분석 결과 미생물 바이오차 펠렛 처리구에서 군집 변화에 차이가 있는 것을 확인하였지만, 바이오차에 접종한 2종의 균 모두 배추 근권부에서 우점하는 양상을 보이지는 않았다. 일반적으로 1 g의 토양에는 약 $10^8 \sim 10^9$ CFU의 세균류가 분포하는 것으로 알려져 있으며[19], pH, 온도, 수분 등 다양한 불리한 토양 환경 요인으로 인해 특정 미생물 종이 근권부에서 우점하거나 장기간 정착하는 것은 어려운 것으로 판단되었다.

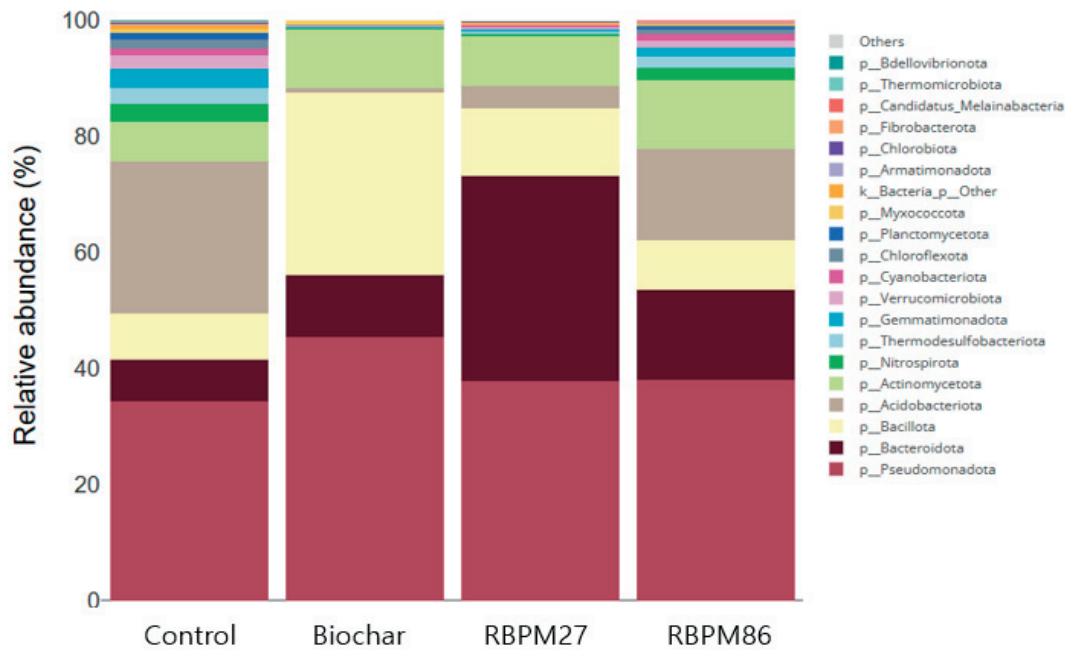


Fig. 5. Microbial community shifts in the rhizosphere soil with Kimchi cabbage cultivation.



Fig. 6. Comparative analysis of the relative abundance of microbial species following microbial biochar pellet application.

이와 같은 결과는 접종 균주가 토양 내에서 우점하는 것은 어렵지만, 검출 농도가 낮더라도 근권부 군집 양상이 변화함에 따라 토착 미생물 군집 구조에 간접적인 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 이러한 작물 근권부 군집 환경의 변화는 근권 생태계 내 미생물간 경쟁, 상호작용, 항균물질 생산을 통해 간접적으로 뿌리혹병 발병 억제에 기여했을 가능성이 제시된다.

온실가스 배출량 분석

배추 재배기간 동안 미생물 바이오차 펠릿 사용에 대한 누적 CH_4 발생량은 RBPM86에서 $5.10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 가장 낮게 발생하였으며, 대조구와 비교하여 29%의 저감효과를 보였다(Fig. 7). CH_4 는 산소가 부족한 혐기적 조건에서 발생하므로 산소 함량이 증가하면 CH_4 발생량을 줄일 수 있는 것으로 보고된 바 있다[20].

누적 N_2O 발생량을 식 (1)을 이용하여 산정하였으며, Fig. 8에 나타내었다. N_2O 발생량은 정식 후 발생량은 처리구에 상관없이 배추 정식 후 8일 차에 가장 높게 나타났으며, 그 이후로는 점차 감소하는 경향이였다. 누적 N_2O 발생량은 RBPM27 처리구에서 $6.98 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 가장 적게 발생하였다. 대조구와 비교하여 69%가 저감되는 것으로 산정되었다.

토양에 바이오차를 1~2% 혼용함으로써 N_2O 발생량을 27% 줄이는 반면 10% 이상 바이오차 사용 시 N_2O 발생량을 87% 줄일 수 있다고 보고한 결과[21]에 비하여 저감되는 발생량은 상대적으로 적지만, 유사한 경향을 보여주었다.

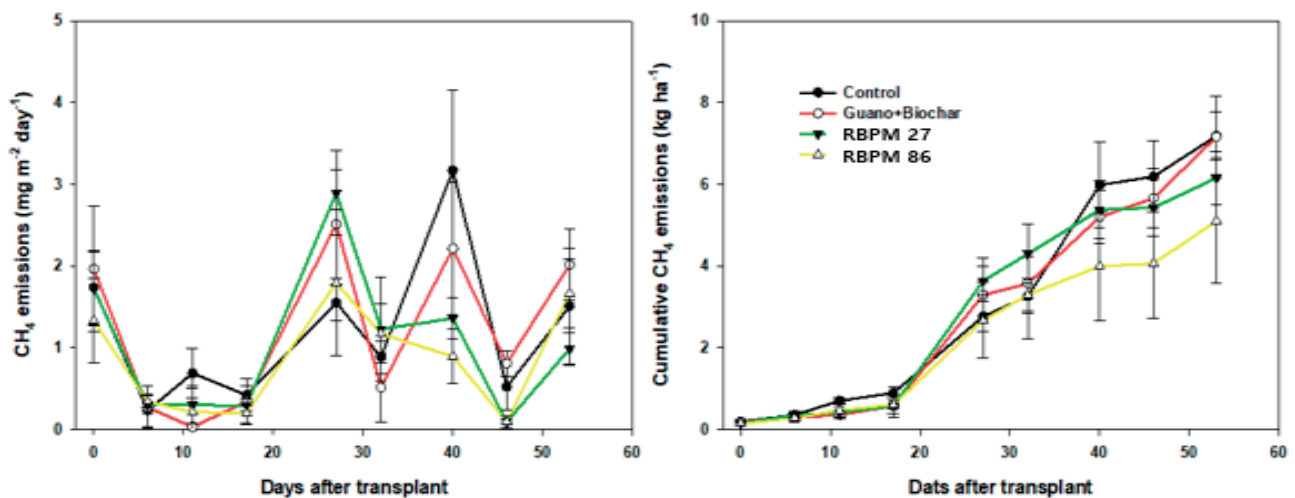


Fig. 7. Changes in CH_4 emissions (A) and cumulative CH_4 emissions (B) during Kimchi cabbage cultivation following application of biochar pellets inoculated with *Pseudomonas fluorescens* 22BCO027 and *Bacillus megaterium* 22BCO086.

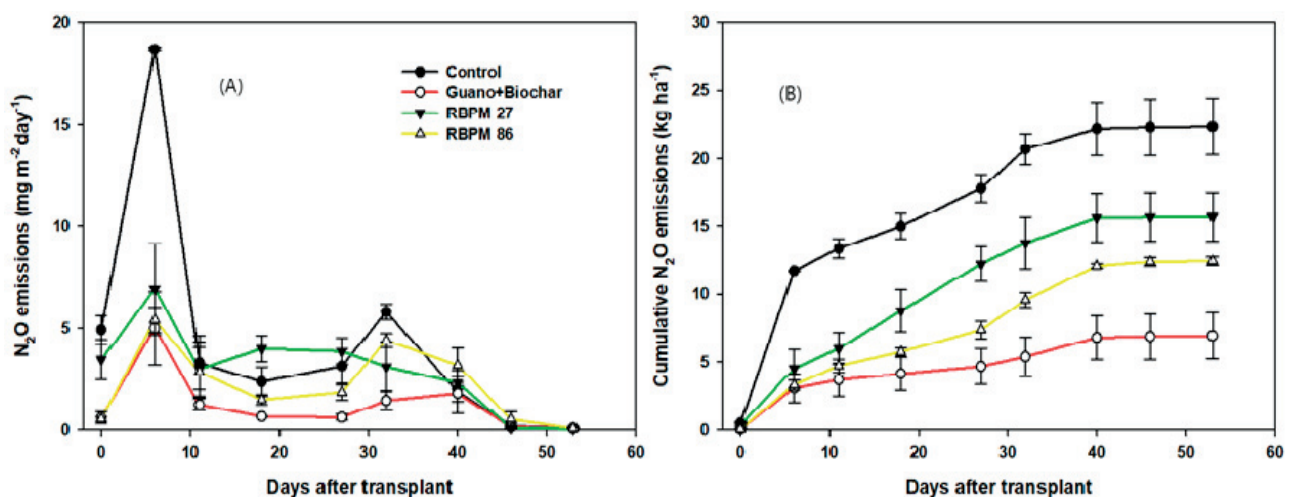


Fig. 8. Changes in N_2O emissions (A) and cumulative N_2O emissions (B) during Kimchi cabbage cultivation following application of biochar pellets inoculated with *Pseudomonas fluorescens* 22BCO027 and *Bacillus megaterium* 22BCO086.

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

Author Contributions: J.H.P. and B.J.P. designed the study; J.H.P. wrote the manuscript; B.J.P. reviewed the manuscript; J.H.P., S.J.K., M.J.K., J.S.S., and B.J.P. measurement and collected the data. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Development and field demonstration of carbon sequestering organic agricultural material utilization technology for the control of club root disease on the Crucifer crops (RS-2022-RD010395)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.29>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Joo-Hee Nam.

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. Korea Rural Economic Institute (KREI) (2023) Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies in Korea. KREI Report.
2. Climate Central (2020) Peak CO₂ & Heat-trapping Emissions. Retrieved from <https://www.climatecentral.org/climate-matters/peak-co2-heat-trapping-emissions>.
3. Jeong EK, Jang HC, Yong YR, Kim BS (2003) Screening of effective control agents against bacterial soft rot on Chinese cabbage in alpine area. The Korean Journal of Pesticide Science, 7(1), 32–37.
4. Kim SS, Lee JT, Lee KJ (2009) Effect of crop rotation on control of clubroot disease of Chinese cabbage caused by *Plasmodiophora brassicae*. Research in Plant Disease, 15(3), 242–247.
5. Yoon CS, Jung EK, Lee SJ, Zhang Y, Lee JE, Kim BS (2010) Screening of resistant Chinese cabbage cultivar against clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) for cultivation in highland. Research in Plant Disease, 16(1), 59–65.
6. Kasinathan H (2012) Influence of pH, temperature, and biofungicides on clubroot of canola. Journal of Plant Pathology & Microbiology, 3(6), 1000146.
7. Niu B, Paulson JN, Zheng X, Kolter R (2020) Simplified and representative bacterial community of maize roots. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 114(12), E2450–E2459. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616148114>.
8. Shin J, Park D, Hong S, Jeong C, Kim H (2021) Influence of activated biochar pellet fertilizer application on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in rice (*Oryza sativa* L.) production. Environ Pollut, 285, 117457. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117457>.
9. Nam JH, Kim MJ, Shim CK, Park SW, Hong SG, Joo OJ, An NH, Choi JE, Yoon SI, et al. (2024) Mineralized patterns of plant nutrient and greenhouse gas emissions in soil incorporated with acidified biochar pellets with fish powder. Journal of Organic Resources Recycling, 32(4), 5–16.
10. Choi JI, Lee DG, Kim MJ, Nam JH, Shim CK, Hong SG, Shin JD (2023) Effect of soil nutrient leaching pattern by rice hull biochar and fish meal mixture with adjusted pH. Journal of Organic Resources Recycling, 31(3), 55–64.
11. Rural Development Administration (2012) Investigation Standards for Crop Research. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
12. IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
13. De La Fuente L, Montanes E, Meng Y, Li Y, Burr TJ, Hoch HC, Wu M (2004) *Pseudomonas syringae* pv. tomato: Virulence factors and their regulation. Annual Review of Phytopathology, 42, 429–451. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140238>.
14. Chintala R, Mollinedo J, Schumacher TE, Papiernik SK, Malo DD, Julson JL (2014) Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 60(3), 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>.
15. Bhatt K, Maheshwari DK (2020) *Bacillus megaterium*: Plant growth promoting bacteria for sustainable agriculture. In: Maheshwari DK (Ed.), Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability. Springer, Singapore, pp. 99–122. <https://doi.org/>

10.1007/978-981-15-2791-5_6.

16. Kang SM, Waqas M, Shahzad R, You YH, Asaf S, Khan MA, Lee KE, Kim JG, Lee IJ (2014) Isolation and characterization of plant growth-promoting rhizobacteria from halophyte plants to promote salinity tolerance in wheat. *Plant Biosystems*, 148(6), 1047–1056. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.966302>.
17. Dimkić I, Stanković S, Nišić M, Petrić M, Ristivojević P, Fira D, Berić T (2021) Characterization and evaluation of two *Bacillus* strains with potential as biological control agents against tomato bacterial wilt. *Microorganisms*, 9(5), 1057. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051057>.
18. Van Agtmaal M, van Os GJ, Hol WHG, van Bruggen AHC (2015) Legacy effects of anaerobic soil disinfestation on soil bacterial community composition and production of pathogen-suppressing volatiles. *Frontiers in Microbiology*, 6, 701. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00701>
19. Torsvik V, Øvreås L (2002) Microbial diversity and function in soil: From genes to ecosystems. *Current Opinion in Microbiology*, 5(3), 240–245. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(02\)00324-7](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00324-7)
20. Jeffery S, Verheijen FGA, van der Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 175–187.
21. Cayuela M, Jeffery S, van Zwieten L (2015) The molar H: C ratio of biochar is a key factor in mitigating N₂O emissions from soil. *Agric Ecosyst Environ*, 202, 135–138.