Effects on Growth Characteristics of Chinese Cabbage to Application of Formulated Granular Fertilizer Contained Activated Biochar

In-Ho Jung¹, Hong-Sik Na², Minsoo Kim³, Hong-Shik Nam⁴, and JoungDu Shin^{5*}

¹Researcher, Nousbo Co., Ltd., Suwon 16614, Korea

²Director of Research Institute, Nousbo Co., Ltd., Suwon 16614, Korea

³Graduate Student, Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Korea

⁴Research Scientist, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

⁵Principal Scientist, Department of Climate Change and Agro-ecology, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: jdshin1@korea.kr

ABSTRACT

Received: July 10, 2020

Revised: August 25, 2020

Accepted: August 31, 2020

ORCID

JoungDu Shin

<https://orcid.org/0000-0002-5941-3438>

This study was conducted to develop an eco-friendly slow-release fertilizer by utilizing activated biochar through black carbonization of rice hull biochar and activated palm biochar. To manufacturing these fertilizers, the raw materials were ground into powder form, mixed with the binder, granulated, and then screened and dried. The best six types were selected by considering the hardness and coupling degree with activated biochar and binder. The nutrient contents of the granular fertilizer contained within the activated biochar were 30-0-13 (N-P₂O₅-K₂O, %). Results did not show a significant effect on cabbage's leaf color, length, and width among the different treatments except for the control. However, it showed that the highest yield among the treatments was 3.5 kg plant⁻¹ in the treatment of 5% of rice hull activated biochar. In this treatment, the yield was increased by 20% relative to that of the control. Therefore, it was decided that the optimum mixing ratio was 5% of activated rice hull biochar.

Keywords: Activated biochar, Cabbage cultivation, Granular fertilizer

Granular type of
rice hull
activated biochar

Their contents

5% 10% 20% 30% 50%

Granular type of
palm activated
biochar

Their contents

5% 10% 20% 30% 50%

The best six types were selected for considering the hardness and coupling degree with activated biochar and binder.

Introduction

농업 유래 부산물 바이오매스 발생량은 2010년도 기준으로 약 80만 tonnes yr⁻¹이라고 보고되었다 (MIFAFF, 2010). 다양한 목적으로 이용할 수 있는 바이오차는 산소가 없는 조건에서 바이오매스 전환 기술을 통하여 생산되는 다공 전환성 탄소 소재이다 (Zhang et al., 2017). 바이오차의 구성 물질은 원료와 열분해 조건에 좌우된다고 하였다 (Domene et al., 2015; Genesio et al., 2015; Subedi et al., 2017). 농업 부산물로부터 생산된 바이오차는 100년 동안 미생물에 의해 분해되지 않는 탄소 이중 고리와 방향족으로 구성되어있다 (Liu et al., 2015). 바이오차는 양분을 흡착하여 보유하는 능력이 있기 때문에 (Ding et al., 2016), 많은 연구자들에 의해 바이오차를 토양에 사용하는 것이 질화 작용 비율을 증가시키고 작물의 질소 이용 유효도를 변화시킨다는 연구결과가 보고된 바 있으며 (Lehmann et al., 2003; Ding et al., 2010), 바이오차 사용시 대두에서 50% 이상, 잔디에서 80% 이상 N₂O 배출량이 감소된다고 보고되었다 (Rondon et al., 2005). 국내에서 바이오차는 암모늄태 질소(NH₄-N)와 인(PO₄-P)을 흡착하는 특성에 대한 작물 재배 연구가 보고된 바 있으며 (Shin et al., 2017), Shin and Park (2018)은 돈분 혼합 Biochar pellet에서 다공성인 biochar의 혼합 비율이 증가할수록 N, P, K 용출이 지연된다는 결과를 보고하였으며, 돈분 퇴비와 바이오차를 혼합하여 만든 돈분 바이오차 펠렛 형태는 돈분 퇴비보다 NH₄⁺-N를 더 천천히 방출시킨다고 보고 하였다. 또한 바이오차를 사용하면 NH₃ 휘산이 저감 되어 질소 이용효율이 높아져 벼 수량이 증가한다는 발표하였다 (Sun et al., 2019). 바이오차와 돈분 퇴비 혼합비에 따른 작물 생육에 관한 연구 결과 돈분과 바이오차 혼합비 (6:4) 처리구에서 상추 수량이 11% 증수되었다고 보고 하였다 (Shin et al., 2018). 이와 비슷한 연구로 Kim et al. (2019)은 배추 재배 시 돈분 퇴비와 바이오차의 혼합비 6:4로 바이오차 펠렛 완효성 비료를 제조하여 추천 질소 사용량 기준으로 60%로 시비하였을 때, 바이오차 펠렛 처리구에서 대조구보다 토양 중의 NO₃-N의 농도는 천천히 감소하였고, 배추 수량은 대조구와 비교하여 특이적 차이가 없다고 보고 하였다.

더 나아가 Black carbon화를 통한 활성 바이오차는 농업부산물을 직접 탄화한 바이오차를 초임계 장치를 이용한 고온 습식 처리를 통하여 얻을 수 있는데 농업부산물을 직접 탄화한 바이오차에 비해서 표면적은 700배 이상, 기공성은 95배 이상으로 유기화합물에 대한 흡착력은 120배 증가한다고 보고된바 있다 (Xiao et al., 2018). 그러나 바이오차 펠렛화에 따른 완효성 비료에 대한 연구 사례는 있지만, 양분과 바이오차를 포함한 입상 형태의 비료에 관한 연구는 전무한 상태에 있다.

따라서 본 연구는 활성 바이오차를 이용한 입상형 완효성 비료 개발에 따른 제조공정 개발 및 배추 생육 효과 평가를 통해 적정 활성 바이오차 함량 선정을 위해 수행하였다.

Materials and Methods

활성 바이오차 제조 조건 본 연구에 시험 재료로 사용한 바이오차는 왕겨를 원료로 하여 만든 제품 (유기산업 (주), 전북)을 구매하여 이용하였다. 왕겨 바이오차 100 g에 6M KOH 용액을 50 ml 처리하여 850°C에서 활성화시켰다. 활성 바이오차는 증류수를 이용하여 세척 후 0.5 mm에서 2 mm 채 사이로 걸러주어 80°C에서 48시간 동안 건조 하였다. 야자수 바이오차를 1,300°C에서 활성화한 야자수 활성 바이오차를 구매하여 본 실험에 사용하였다.

활성 바이오차를 이용한 완효성 비료 제조 Black carbon화를 통한 활성 바이오차를 이용한 완효성 비료 제

조는 왕겨를 원료로 한 왕겨 활성 바이오차와 아자수를 원료로 한 활성 아자수 바이오차를 사용하였다. 비료의 성분을 질소와 칼륨으로 구성하였으며 질소원으로 요소, 칼륨원으로는 황산 칼륨을 사용하였고 요소, 황산 칼륨, 활성 바이오차 및 조립제를 일정 비율로 혼합한 후 입상화 하였다.

완효성비료의 구성은 밑거름용 일반 비료에 완효성 효과가 있는 질소, 칼륨이 추가된 형태로 제조 되므로, 이에 맞게 활성 바이오차 완효성 비료를 질소와 칼륨으로 구성하여 제조하였다.

입상화를 위해서 조립제인 dolomite를 사용하여 활성 바이오차 투입 비율로 혼합하였으며, 활성 바이오차의 투입 비율은 0%, 5%, 10%, 20%, 30% 50%를 부피 비로 혼합하였고 조립제의 함량은 0%, 5%, 10%, 15%, 20%로 제조하였다.

입상 완효성 비료는 활성 바이오차 함량과 조립제의 함량에 따른 조립 정도를 조사하고 시제품의 성분 함량, 입상화 정도 및 강도 등을 고려하여 활성 바이오차 함량에 따른 적정 조립제 함량을 선정하였다.

활성 바이오차를 이용한 완효성 비료의 생물 검정 활성 바이오차를 함유한 완효성 비료의 생물 검정은 제조공정에서 1차로 선별된 활성 바이오차를 함유한 완효성 비료를 활성 바이오차의 투입량에 따른 효과를 검정하였다.

대상 작물은 배추 (춘광)를 공시하였고, 재배 관리는 표준재배방식에 따라 멀칭하였으며, 3반복으로 실시하였다. 비료의 사용량은 농촌진흥청 작물 별 비료 시용 량 중에 배추 비료 시용기준에 따랐으며, 활성 바이오차 처리구는 밑거름으로 일반 시판 비료로 사용하여 질소 기준 $11 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이 되도록 시비하였다. 웃거름으로는 활성 바이오차를 함유한 비료를 사용하여 질소 기준 $21 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이 되도록 정식 전에 전량 기비로 사용하였다. 관행의 경우 밑거름, 웃거름 둘 다 일반 시판 비료를 사용하였고 밑거름은 질소 기준 $11 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 가 되도록 하여 정식 전에 시비 후 토양 혼화하였고, 웃거름은 멀칭 재배로 인해 농촌진흥청 시비 기준의 2배가 되도록 질소 기준 $21 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 를 정식 후 20일 간격으로 2회 골 뿌림으로 시비하였다. 배추 생육 조사는 정식 2주 후부터 2주 간격으로 엽장, 엽폭 및 엽색도 (SPAD)를 측정하였고 최종 수확 후 생체 중을 측정하였다.

통계 분석 통계 분석은 SAS 9.2 version (SAS, Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 처리 간에 배추 생육 특성을 비교하기 ANOVA 분석을 하였으며, 표준 오차 및 Duncan 다중 검정을 하였다.

Results and Discussion

활성 바이오차를 이용한 완효성 비료 공정 및 개발 제조공정은 비료 원료를 비율에 따라 혼합을 한 뒤 입상 성형기 (Fan granulator)를 이용하여 입상 성형하고, 입상 크기 2~4 mm 사이의 입상 만 1차 선별을 한 후 상온에서 2 시간 동안 1차 건조를 시켰다. 건조한 시제품을 동일 크기로 2차 선별 후 드라이오븐에서 60°C 로 24시간 2차 건조 후 최종 입상 크기 선별을 하여 제조하였다 (Fig. 1과 Fig. 2).

혼합한 비료 원료를 활성 바이오차의 투입 비율에 따라 조립 정도를 테스트한 결과, 활성 바이오차 투입 비율이 높아질수록 조립제의 투입 비율도 높아져야 조립이 이루어졌다. 하지만, 조립제인 dolomite 함량이 높아질수록 그에 따른 비료 원료의 투입량이 적어져 비료 성분 량이 낮아지는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 활성 바이오차 0%, 5% 투입 시 dolomite 함량을 5%로 활성 바이오차 10%, 20% 투입 시 dolomite 함량을 10%로 선정하였으며, 활성 바이오차 30% 투입 시 dolomite 15%, 활성 바이오차 50% 투입 시 dolomite 20%로 혼합하였을 때 적절한 조립질의 입

상이 형성됨이 판단되었기에 이를 1차 선정하였으며 (Table 1), 선정된 활성 바이오차 완효성 비료의 비료 성분량은 Table 2와 같으며, Fig. 3과 같이 제조공정을 확립하였다.

Fig. 1. Manufacturing process of granular fertilizer contained with different activated biochars.

Fig. 2. Granular types of slow-release fertilizer contained with rice hull activated biochar and palm activated biochar.

Table 1. Coupling degree with different contents of activated biochar according to mixing ratios of dolomite.

Contents		Dolomite				
		0%	5%	10%	15%	20%
Activated biochar	0%	2	5	5	5	5
	5%	1	5	5	5	5
	10%	1	4	5	5	5
	20%	1	3	5	5	5
	30%	1	3	3	5	5
	50%	1	1	3	4	5

* Degree of coupling : 1~5 (low ~ high).

Table 2. Production of fertilizer formulor with different combination ratios of activated biochar and dolomite.

Treatments		Mixture ratio (%)				Fertilizer formula (N-P-K, %)
		Activated biochar	Urea	Potassium sulfate	Dolomite	
Activated biochar	0%	0	67.0	28.0	5	30-0-13
	5%	0.4	66.6	28.0	5	30-0-13
	10%	0.8	63.6	25.6	10	29-0-12
	20%	1.6	63.4	25.0	10	29-0-12
	30%	2.4	59.0	23.6	15	27-0-11
	50%	4.0	54.0	22.0	20	24-0-10

* The mixture ratio is calculated with its weight.

Fig. 3. Diagram for manufacturing processes of granular type contained activated biochar with different fertilizers.

활성 바이오차를 이용한 완효성 비료의 배추 생육 효과 활성 바이오차의 함량에 따른 완효성 비료 비료의 배추 생육 효과 구명 시험에서는 왕겨 활성 바이오차 및 야자수 활성 바이오차 함량에 따른 배추의 엽색도는 왕겨 활성 바이오차 5%, 10% 처리구에서 높게 나타났으며, 정식 후 14일과 26일 사이에는 유의차 ($p < 0.01$)가 인정 되었고 무처리구를 제외한 전체 처리구간 유의적인 차이를 보이지는 않았다 (Fig. 4). 또한 엽장과 엽폭은 활성 바이오차 5% 처리구에서 각각 0.5 cm, 0.8 cm 더 높았고, 바이오차의 함량이 높아질수록 낮아지는 경향이었으나, 무처리구를 제외한 전체 처리구간 유의적인 차이를 보이지 않았다 (Table 3).

배추재배 시 바이오차 펠렛 완효성 비료 적정 사용량 구명 연구에서 초장은 다른 처리구에 비해 대조구에서 가장 높게 나타나, 이는 초기 생육에 있어서 속효성 비료에 의한 작물 생육 효과가 큰 것으로 판단되었다고 발표하였으며 (Kim et al., 2019), 배추 재배 시 바이오차 토양 혼화 처리는 무처리구와 바이오차 처리구간 1년 차 생육은 유의적인 차이가 없었다고 발표하였다 (Heo et al., 2018). 또한 엽장과 엽폭이 바이오차 처리구에서 무처리와 비교 시 증가율이 보이지 않았으며 (Oh et al., 2017), 이는 본 시험의 결과와 같았다.

Fig. 4. Effect of leaf color (SPAD) of cabbage to application of different modified supplemented granules with different mixing ratio of activated biochar during cultivation periods. Mean values of three replications with standard deviations ($P < 0.05$).

Table 3. Effect of leaf length and width of cabbage to application of different modified supplemented.

Treatments		Leaf length (cm)		Leaf width (cm)	
		DAT 14	DAT 27	DAT 14	DAT 27
Control		13.85 ± 2.05ab	27.51 ± 1.34a	12.73 ± 1.23ab	25.62 ± 2.25ab
Activated rice hull biochar	5%	14.43 ± 1.00a	27.97 ± 1.07a	13.51 ± 0.65a	26.25 ± 0.79a
	10%	14.27 ± 0.70ab	27.83 ± 1.08a	13.00 ± 0.98ab	25.68 ± 1.10ab
	20%	13.53 ± 0.81ab	26.25 ± 1.46b	13.06 ± 0.68ab	25.01 ± 0.77b
	30%	14.09 ± 0.66ab	27.55 ± 1.19a	12.40 ± 1.12bc	25.32 ± 1.55ab
	50%	13.23 ± 2.32b	26.32 ± 1.09b	11.73 ± 1.06c	23.59 ± 1.47c
Activated palm biochar	5%	14.47 ± 0.92a	27.11 ± 1.28ab	12.57 ± 1.10b	25.05 ± 1.87b
	10%	14.04 ± 1.63ab	27.05 ± 1.37ab	12.95 ± 1.28ab	25.73 ± 1.16ab
	20%	14.17 ± 0.79ab	26.90 ± 0.79ab	13.11 ± 0.99ab	25.26 ± 0.78ab
	30%	13.35 ± 0.67b	26.37 ± 1.53b	12.81 ± 1.15ab	24.85 ± 1.82b
	50%	14.11 ± 0.95ab	27.14 ± 1.74ab	12.40 ± 1.22bc	25.09 ± 1.27ab
F-value		1.65	3.23	2.96	3.35
Pr > F		0.1	0.001	0.01	0.001

Mean values followed by different letters, which indicate significant differences ($p < 0.001$) among treatments with One-way ANOVA by mean comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD analysis for leaf length and width. DAT; days after transplant.

활성 바이오차의 함량에 따른 완효성 비료 효과를 구명하기 위해 왕겨 활성 바이오차의 함량 및 활성 아자수 바이오차 함량에 따른 배추의 수량은 표준 재배 처리구 수량은 포기당 2.9 kg보다 높거나 비슷한 수준이었다. 왕겨 활성 바이오차가 5% 혼합된 처리구에서 배추 수량이 포기당 3.5 kg로서 가장 높게 나타났으며, 수량 지수는 대조구 대비 20% 증가하였다. 하지만 왕겨 활성 바이오차가 20% 이상 혼합된 처리구에서는 대조구와 비슷하거나 오히려 감소하였고, 아자수 활성 바이오차 처리구는 혼합비와 관계없이 대조구의 수량과 비슷하거나 감소하였다 (Table 4).

농업부산물을 활용한 활성 바이오차의 함량에 따른 완효성 비료 효과에 관한 결과를 볼 때, 다공성인 바이오차의 양이 많을수록 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 용출이 지연된다고 하였다 (Shin et al., 2018). 하지만 바이오차 처리에 따른 토양 pH의 상승

Table 4. Effect of cabbage yield to application of different modified supplemented granules with different mixing ratio of activated biochar during cultivation periods.

Treatments		Fresh weight (kg/plant)	Yield index (%)
Control		2.92 ± 0.37c	100
Rice hull activated biochar	5%	3.51 ± 0.31a	120
	10%	3.23 ± 0.65b	110
	20%	2.74 ± 0.16c	94
	30%	2.97 ± 0.45bc	102
	50%	2.70 ± 0.22c	92
Activated palm biochar	5%	2.88 ± 0.58c	99
	10%	2.89 ± 0.29c	99
	20%	2.81 ± 0.33c	96
	30%	2.75 ± 0.36c	94
	50%	2.83 ± 0.32c	97
F-value		5.66	-
Pr > F		0.001	-

Mean values followed by different letters, which indicate significant differences ($p < 0.001$) among treatments with One way ANOVA by mean comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD analysis for fresh weight.

은 배추의 최적 생육 조건 범위를 벗어나게 만들어 생육에 좋지 않은 영향을 보인다고 하였으며 (Oh et al., 2017), 완효성 비료 적정 사용량 연구에서 배추의 생체중은 N 40% 처리구는 대조구와 비교하여 유의차 ($p < 0.05$)가 인정되지 않았다고 발표한바 있다 (Kim et al., 2019). 또한 바이오차의 함량이 높을수록 작물 생육이 저조하다고 발표하였으며 (Lee et al., 2018), 과량의 바이오차가 투입되면 밀도가 낮은 바이오차로 인해 작물의 뿌리 활착이 불리하고 높은 탄소 함량과 낮은 양분함량으로 인해 C/N률이 증가 되어 작물의 양분 이용 능력이 감소할 수 있다고 발표한바 있다 (Kang et al., 2017). 이는 본 실험 결과인 활성 바이오차 함량이 20% 이상의 처리구에서 수량이 감소한 것과 연관이 있을 것으로 판단된다. 또한, 야자수 바이오차는 원료와 생산과정에 따라 특성이 달라지는 물질이라는 결과와 마찬가지로 원료에 차이로 인한 것으로 판단된다 (Smith et al., 2010).

본 연구에서는 6M KOH 용액을 바이오차에 분사하여 반응기 온도 850°C에서 1일만에 걸쳐 탄화 (Carbonization) 을 통한 왕겨 활성 바이오차를 이용한 입상 완효성 비료를 개발하는 과정에서 적정 혼합비를 구명함으로써 배추 수확량 20%의 증수 효과를 보였으며, 배추재배에서 활성 바이오차의 함량이 5% 혼합된 입상 비료가 최적 함량으로 판단하였다.

Conclusions

농업부산물인 왕겨 및 야자수 바이오차의 Black carbonization을 통한 친환경 농 자재 개발을 위해 본 연구를 수행하였다. 입상형 완효성 비료 제조에서 비료 원료를 활성 바이오차에 흡착시키고 조립제인 dolomite 함량에 따라 입상화 정도를 조사한 결과는 활성 바이오차의 함량이 높아질수록 조립 정도가 낮아지는 것으로 나타났으며, 조립제의 함량이 높아질수록 조립 정도가 높아지는 특성을 보였다. 활성바이오차를 이용한 완효성 비료의 생물검정에서 배추의 수량은 왕겨 활성 바이오차의 함량이 5% 혼합된 처리구에서 포기당 3.5 kg로 가장 높았고, 수량 지수는 대조구 대비

20% 증가하였고, 야자수 활성 바이오차는 함량과 상관없이 대조구보다 낮거나 비슷하게 나타났다. 따라서 입상 완효성 비료 개발을 위한 활성 바이오차는 왕겨 활성 바이오차가 야자수 활성바이오차보다 효과가 좋았으며, 왕겨 활성 바이오차의 최적 함량은 5%인 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea [Project No: PJ 01381401].

References

- Ding, Y., Y. Liu, S. Liu, Z. Li, X. Tand, X. Huang, G. Zeng, L. Zhou, and B. Zheng. 2016. Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 36:1-18.
- Ding, Y., Y. Liu, W. Wu, D. Shi, M. Yang, and Z. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water Air Soil Pollut.* 231(1):448-453.
- Domene, X., A. Enders, K. Hanley, and J. Lehmann. 2015. Eco-toxicological characterization of biochars: role of feedstock and pyrolysis temperature. *The Science of Total Environment*. 15:552-561.
- Genesio, L., F. Miglietta, S. Baronti, and F.P. Vaccari. 2015. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: results from a four years field experiment in Tuscany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 201:20-25.
- Heo, S.J., S.J. Lim, Y.H. Seo, B.S. Yoon, Y.H. Park, and D.K. Hong. 2018. Effect of Bio-char Continuous Use on Chinese cabbage Growth. *Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer*. 10:177-177.
- Kang, S.W., S.H. Kim, J.H. Park, D.C. Seo, and J.S. Cho. 2017. Selection of optimal application condition of corn waste biochar for improvement of corn growth and soil fertility. *Kor. J. Soil. Sci. Fert.* 50(5):452-461.
- Kim, H.S., S.I. Yun, E. Jang, and J.D. Shin. 2019. Investigation of an Optimum Application Rate of Blended Biochar Pellet as Slow Release Fertilizer during Cabbage Cultivation. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*. 27(1):49-56.
- Lee, J.H., C.J. Seong, S.S. Kang, H.C. Lee, S.H. Kim, J.S. Lim, J.H. Kim, J.H. Yoo, J.H. Park, and T.K. Oh. 2018. Effect of different types of biochar on the growth of chinese cabbage. *Korean Journal of Agricultural Science*. 45(2):197-203.
- Lehmann, J., J. Pereira da Silva, C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, and B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil*. 249(2):343-357.
- Liu, W.J., H. Jiang, and H.Q. Yu. 2015. Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. *Chemical Reviews*. 115:12251-12285.
- MIFAFF. 2010. Annual Statistics in Food, Agriculture, Fisheries and Forestry in 2009. Korean Ministry for Food, Agriculture, Fisheries and Forestry.
- Oh, T.K., J.H. Lee, S.H. Kim, and H.C. Lee. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *KJOAS*. 44(3):359-365.
- Rondon, M., J.A. Ramirez, and J. Lehmann. 2005. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils. <https://soilcarboncenter.k-state.edu/conference/USDA/Abstracts/html/Abstract%20/Rondon.htm>.
- Shin, J., E. Choi, E.S. Jang, S.G. Hong, S. Lee, and B. Ravindran. 2018. Adsorption characteristics of ammonium

- nitrogen and plant responses to biochar pellet. *Sustainability*. 10:1331-1342.
- Shin, J.D. and S.W. Park. 2018. Optimization of Blend Biochar Pellet by the Use of Nutrient Releasing Model. *Appl. Sci.* 8(11):2274-2286.
- Shin, J.D., Y.S. Choi, E.J. Choi, M.S. Kim, and J.W. Heo. 2017. Evaluation of efficiency to Plant Growth in Horticultural Soil Applied Biochar Pellet for Soil Carbon Sequestration. *J of the Korea Organic Resources Recycling Association*. 25(3):73-78.
- Smith, J.L., H.P. Collins, and V.L. Bailey. 2010. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*. 42:2345-2347.
- Subedi, R., C. Bertora, L. Zavattaro, and C. Grignani. 2017. Crop response to soils amended with biochar: expected benefits and unintended risks. *Italian Journal of Agronomy*. 12:161-173.
- Sun, X., T. Zhong, L. Zhang, K. Zhang, and W. Wu. 2019. Reducing ammonia volatilization from paddy field with rice straw derived biochar. *Science of The Total Environment*. 660:512-518.
- Xiao, F., A.H. Bedane, J.X. Zhao, M.D. Mann, and J.J. Pignatello. 2018. Thermal air oxidation changes surface and adsorptive properties of black carbon (char/biochar). *Science of the Total Environment*. 618:276-283.
- Zhang, X., L. Zhang, and A. Li. 2017. Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and pinewood sawdust for nutrient-rich hydrochar production: synergistic effects and products characterization. *Journal of Environmental Management*. 201:52-62.