

Effect of the Application of Carbonized Biomass from Crop Residues on Soil Organic Carbon Retention

Sun-II Lee*, Woo-Kyun Park, Gun-Yeob Kim, and Joung-Du Shin

Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea

(Received: November 5 2014, Revised: November 17 2014, Accepted: November 17 2014)

This study was conducted to investigate the effect of carbonized biomass from crop residues on soil carbon storage during soybean cultivation. The carbonized biomass was made by field scale mobile pyrolyzer. The treatments consisted of control without input and three levels of carbonized biomass inputs as 59.5 kg 10a⁻¹, C-1 ; 119 kg 10a⁻¹, C-2 ; 238 kg 10a⁻¹, C-3. Soil samples were collected during the 113 days of experimental periods, and analyzed soil pH and moisture contents. Soil carbon contents and soybean yield were measured at harvesting period. For the experimental results, soil pH ranged from 6.8 to 7.5, and then increased with increasing carbonized material input. Soil moisture contents were slightly higher by 0.1~1.5% than the control, but consistent pattern was not observed among the treatments. Soil carbon and organic carbon contents in the treatments increased at 24 and 15% relative to the control at 15 days after sowing, respectively. Loss rate of SOC (soil organic carbon) relative to its initial content was 7.2% in control followed by C-1, 6.8% > C-2, 3.5% > C-3, 1.1% during the experimental periods. The SOC change rate decreased with increasing carbonized biomass rate. It was appeared that soybean yields were 476.9 kg 10a⁻¹ in the control, and ranged from 453.6 to 527.3, kg 10a⁻¹ in the treatments. However, significant difference was not found among the treatments. It might be considered that the experimental results will be applied to soil carbon sequestration for future study.

Key words: Carbonized biomass, Crop residues, Pyrolyzer, Soil organic carbon

The SOC change rate decreased with increasing carbonized biomass rate.

Treatment	15 days after treatment	113 days after treatment	Changes in SOC content
	SOC	SOC	
	g kg ⁻¹		(%)
Control	6.6±0.5a	6.2±0.2b	7.2
C-1	7.7±0.3a	7.2±0.3ab	6.8
C-2	7.8±0.7a	7.5±0.6a	3.5
C-3	7.3±0.2a	7.2±0.2ab	1.1

*Corresponding author : Phone: +82632382495, Fax: +82632383823, E-mail: silee83@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ00938302), Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

우리 삶은 논과 밭, 그리고 산림에서 광합성을 통해 생산되는 바이오매스 (Biomass) 자원들을 음식이나 목재 또는 에너지원으로 활용하여 살아왔다. 바이오매스는 '생물자원 (Bio)'의 '양 (Mass)'을 의미하는 합성어로 화석연료 자원을 제외한 유기체를 바탕으로 한 재생 가능한 유기성 자원이다. 최근에는 화석연료의 고갈 위기, 그리고 지구온난화, 온실가스 방출 등 다양한 환경문제가 제기되면서 유기성자원인 바이오매스 활용에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다 (Schneider and McCarl, 2003).

우리나라에서 농업부산물로 발생하는 바이오매스 양은 연간 약 1,160만톤으로 추정된다. 이러한 부산물을 활용하기 위해 바이오에너지화 연구는 활발히 진행되고 있으나 다른 측면에서의 자원순환 활용연구 및 실용화는 거의 없는 실정이다 (Park et al., 2011). 또한 농업분야 온실가스 발생 측면에서 보면 바이오매스를 소각처리하는 것은 온실가스 및 각종 유해가스의 방출을 증가시키는 것으로 알려져 있다 (Zhang et al., 2008). 따라서 농업에서 발생하는 바이오매스를 최적으로 활용하는 방법을 찾는 연구들이 진행되고 있으며, 그 한 방안으로 농업부산물을 탄화된 바이오매스로 변환하여 이용하는 방법이다. 이러한 탄화 바이오매스는 탄소저장 및 토양개량 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 농업부산물을 자원순환하는 바람직한 대안으로 떠오르고 있다 (Laird et al., 2010).

탄화 바이오매스는 농업부산물인 바이오매스를 혐기상태에서 열분해하는 과정을 통하여 만들어 진다. 이러한 탄화 바이오매스는 토양 중에서 화학적으로 안전한 탄소결합 형태를 유지할 수 있으며 (Mathews, 2008), 생물학적 분해의 영향을 크게 받지 않는 난분해성 물질로 알려져 있다 (Ascough et al., 2000; Nichols et al., 2000). 또한 이러한 특성으로 인하여 토양 중에서 분해되지 않고, 장기간 탄소를 저장할 수 있으며 (Lehmann et al., 2006), 일부 연구자들은 탄화물 내의 탄소는 토양내에서 수백년 이상 탄소격리 효과를 얻을 수 있다고 한다 (Lehmann, 2009; Singh et al., 2012). 다른 측면으로 보면 탄화 바이오매스는 산성토양 개량과 더불어 양이온 치환능, 양분 및 수분 보유력 증가 등의 다양한 토양개량 효과가 있다 (Atkinson et al., 2010; Laird, 2008).

현재까지 국내에서는 농가단위에서 농업부산물을 탄화

바이오매스 생산과 더불어 농경지에 투입·활용하는 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 농가 단위에서 이용할 수 있는 탄화장치를 활용하여 농업부산물 유래 탄화 바이오매스를 직접 생산하고, 이를 콩 재배 농경지에 사용하여 일반 바이오매스와의 탄소저장 효과 등을 비교 검토하였다.

Materials and Methods

공시 토양 및 재료 본 연구를 수행하기 위해 충청북도 괴산군 불정면에 위치한 20년 이상 콩재배 현지농가의 밭 토양 (127°51'04"N 36°52'35"E)을 시험포장으로 사용하였다. 시험포장의 토양은 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 토성은 강서통에 속하는 토양으로 점토 13.8%, 미사 11.6%, 모래 74.7%를 포함하는 사양토 (sandy loam)이었다. 또한 화학적 특성은 pH 7.4, T-C 10.3 g kg⁻¹, T-N 1.0 g kg⁻¹, Av.P₂O₅ 966.3 mg kg⁻¹, Ex. K 6.5, Ex. Ca 12.6, Ex. Mg 3.74 cmol kg⁻¹로 나타나 우리나라 일반 밭토양의 평균치 (NAAS, 2013)보다 대체로 높은 토양이었다.

본 연구에 사용한 탄화 바이오매스 제조는 전년도 발생한 콩 부산물의 뿌리와 알곡을 제외한 부분을 건조 과정과 파쇄 후 왕겨와의 질량비를 1:1로 혼합하여 탄화하였다. 탄화조건은 최대한 공극을 줄여 산소 제한조건으로 만든 후 탄화장치 (OCF-400)에 넣어 450°C에서 2시간 30분 열분해 제조하였다. 반응기의 크기는 0.79 × 1.27 m (Φ × h)이며, 재질은 스테인레스로 구성되었다. 공기 유입구와 출구는 바닥 및 상단에 위치하여 있으며, 공기 흐름은 열분해 과정 동안 제어할 수 있다. 또한 스테인레스망은 열분해장치 바닥 15 cm 위에 설치되어 있어 바이오매스가 공기 유입구를 막지 않도록 고안되었다. 탄화 바이오매스의 원료는 건조 과정을 거쳐 잘 마른상태를 이용하여 석유 등의 추가적인 에너지 공급 없이 점화를 시켜 탄화 바이오매스를 생산하였다. 탄화장치에 의해 생산된 탄화 바이오매스의 비율은 원료물질 대비 49.8%로 나타났다. 탄화 바이오매스와 원료물질인 콩 부산물, 그리고 왕겨의 탄소함량은 각각 555.8, 379.9, 247.4 g kg⁻¹으로 나타났다 (Table 2).

시험구 조성 시험구 처리는 콩 재배로 발생하는 바이오매스의 단위면적당 발생량 238 kg 10a⁻¹ (Park et al., 2011)을 근거로 하여 부산물 원료 대비 탄화 바이오매스 생

Table 1. Physico-chemical properties of the experimental soil before crop cultivation.

Soil Texture	pH	EC	T-C	T-N	Av.P ₂ O ₅	Ex. Cations		
						K	Ca	Mg
	(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)		
Sandy loam	7.4	0.20	10.3	1.0	966.3	0.52	12.62	3.74

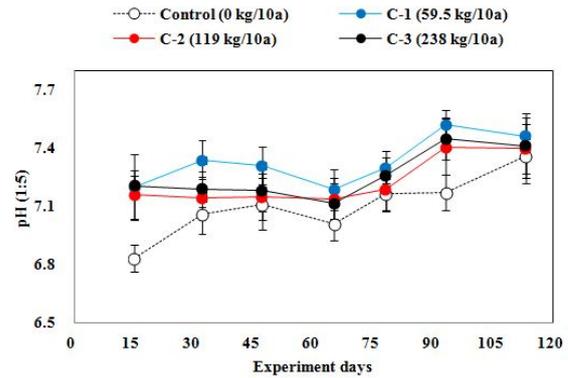
Table 2. Chemical properties of carbonized biomass, residue of soybean and rice hull used.

Variable	pH (1:10)	EC (dS m ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	
Carbonized biomass	10	1.35	555.8	7.4	
Raw material	Residue of soybean	7.3	0.93	380.0	4.9
	Rice hull	7.0	0.68	247.5	3.5

산비율인 50%를 기준으로 정하였다. 따라서 10a당 탄화 바이오매스 119 kg (콩 부산물 발생량 50%)을 100%로 하여 무처리 (대조구), 50% (C-1), 100% (C-2), 200% (C-3) 수준으로 시험구를 배치하였다. 결과적으로 Control, C-1, C-2, C-3 처리구의 탄화 바이오매스를 각각 0, 59.5, 119, 238 kg 10a⁻¹ 사용하여 탄소저장 효과를 시험하였다.

시험처리구당 면적은 32 m² (4 × 8 m)이었고, 포장배치는 난괴법 3반복으로 포장실험을 수행하였다. 시험기간 중에는 잡초방제와 표면유출을 막기 위하여 검은 비닐멀칭을 하였고, 재식밀도는 30 × 80 cm, 수확은 콩 파종 후 113일에 실시하였다. 콩 수확은 콩을 탈곡 한 다음, 흐르는 물에 세척하여 이물질을 제거한 후 드라이 오븐에서 70°C, 72시간 건조 후 건물중으로 측정하였다.

시료채취 및 분석방법 토양시료 채취는 표토 (0~15cm)를 대상으로 토양채취용 오거를 활용하여 격자용으로 각각 5개씩 채취하여 혼합시료로 사용하였다. 토양조제는 2주간 풍건 후 2 mm 체를 통과한 토양시료만을 사용하였다. 토양분석은 토양·식물체 화학분석법 (NAAS, 2000)에 준하여 입경분포, 토양산도 (pH), 전기전도도 (EC), 총탄소 (T-C), 유기탄소 (SOC), 총 질소 (T-N), 유효인산 (Av.P₂O₅), 치환성 양이온 (Ex. K, Ca, Mg)을 분석하였다. 입경분포는 피펫법으로 분석하였으며, 토성은 미 농무성법 분류기준을 따랐다 (Gee and Bauder, 1986). pH는 토양을 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, EC는 pH 측정 후 토양용액을 #42 여과지로 여과 후 EC meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 총 탄소와 유기탄소는 TOC-meter (Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 분석하였으며, 토양 유기탄소 함량측정을 위해 토양시료에 2 M HCl을 기포가 발생하지 않을때까지 침출 건조시켜 무기탄소 성분을 제거 후 TOC 분석기로 분석하였다 (Wang et al., 2012). 총 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany), 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm 파장에서 UV (AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였다. 치환성 양이온은 1 M NH₄OAc 침출하여 ICP (ICP-OES, GBC scientific, USA)로 분석하였다.

**Fig. 1. Changes in the pH and water content of the soil during 113 days of experiment.**

탄화 바이오매스와 원료물질인 콩 부산물, 그리고 왕겨는 건조 후 40 mesh로 분쇄한 시료를 사용하여 pH, EC, T-C, T-N을 토양분석과 동일한 장비로 분석하였다 (NAAS, 2000).

통계분석 탄화된 바이오매스 투입에 따른 토양탄소 저장능 특성차이를 SAS 통계프로그램 (버전 9.2)을 이용하여 실시하였다. 처리간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 일반선형모형을 이용한 ANOVA 검증을 통하여 분석하였으며, F-test 결과 값이 P<0.05의 범위에서 유의한 경우에만 최소유의차 검정 (LSD)을 실시하였다.

Results and Discussion

토양의 pH 및 수분함량 변화 콩 재배기간 중의 토양 pH 및 수분함량 변화는 Fig. 1과 같다. 토양 pH 값은 6.8~7.5 범위로 파종 후 재배기간이 진행되면서 pH 값은 높아지는 경향을 보였다. 또한, 경시적으로는 탄화 바이오매스 투입량이 많을수록 pH 값은 높았으며, 수확기인 파종 후 113일에는 처리간 pH 값 편차가 감소하였다. 재배기간 중 토양의 수분함량도 무처리에 비해 탄화 바이오매스 처리로 약간은 높은 경향 (0.1~1.5%)을 보였으나 측정시기별로는 일정한 경향이 없었다. 다만 콩 재배기간 중의 수분함량의 차이가 파종 후 45일경에 낮았고, 75일경에 높은 것은 계절에 따른 강수량 차이에 기인한다고 볼수 있다. 이러한 결과는 탄화 바이오매스 특성 상 토양 내에서 높은 pH와 양분 교환능력, 그리고 표면적이 큰 다공성 형태를 지니고 있어 토양 pH 값과 수분 보유력을 높이는데 기인한다고 볼수 있다 (Lehmann, 2007; Roberts et al., 2010).

토양의 탄소 변화 Table 3은 콩 파종 후 토양 안정화 시기인 15일과 수확기인 113일에 토양 중의 T-C 및 SOC 농도를 분석한 결과이다. 탄화 바이오매스 처리에 따른 토양

Table 3. Changes in T-C and SOC concentrations of soils.

Treatment	15 days after treatment		113 days after treatment		Changes in C content (%)	
	T-C	SOC	T-C	SOC	TC	SOC
	----- g kg ⁻¹ -----					
Control (0 kg 10a ⁻¹)	8.0±0.5b ^a	6.6±0.5a	7.9±0.4b	6.2±0.2b	1.5	7.2
C-1 (59.5 kg 10a ⁻¹)	9.4±0.3ab	7.7±0.3a	8.4±0.3ab	7.2±0.3ab	10.2	6.8
C-2 (119 kg 10a ⁻¹)	10.5±0.7a	7.8±0.7a	8.9±0.6ab	7.5±0.6a	15.1	3.5
C-3 (238 kg 10a ⁻¹)	9.9±0.3a	7.3±0.2a	9.0±0.2a	7.2±0.2ab	9.1	1.1

^aValues followed by the same letter are not statistically different at $\alpha=0.05$.

내 총 탄소 함량은 파종 후 15일에 무처리 8.0 g kg⁻¹과 비교하여 9.4~10.5 g kg⁻¹ 수준으로 평균 24% 증가한 것으로 나타났다. 또한 유기태 탄소함량도 무처리 6.6 g kg⁻¹과 비교하여 7.7~7.8 g kg⁻¹ 수준으로 평균 15% 정도 증가하였다. 본 조사 결과, 대조구와 탄화 바이오매스 처리구의 총 탄소함량은 통계적으로 유의한 차이를 보였지만, 탄화 바이오매스 투입 수준에 따른 차이는 인정되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 단위면적당 콩 바이오매스 발생량에 준하여 탄화 바이오매스를 처리하여 토양에 추가된 탄소함량이 0.03~0.12% 범위로 투입 전의 토양 총 탄소 함량에 비해 상대적으로 적어 영향이 크지 않는데 기인한다고 볼 수 있다.

콩 파종 후 113일의 토양의 총 탄소 함량은 대조구 7.9 g kg⁻¹, 처리구 7.88~10.5 g kg⁻¹, 유기태 탄소 함량은 대조구 6.17 g kg⁻¹, 처리구 7.18~7.52 g kg⁻¹이었다. 이러한 처리간 경향은 파종 후 15일경의 총 탄소 및 유기태 탄소와 같은 경향이나 113일경에서 통계적으로 유의성 있게 감소하는 것으로 나타났다. 총 탄소 손실률을 보면, 토양 총 탄소는 대조구 1.5%, 처리구 9.1~15.1%였으며, 유기태 탄소 손실률은 대조구 7.16%, 처리구 1.1~6.8%로 나타났다. 이러한 경향치는 총 탄소의 경우 시험전 토양에 축적된 함량이 상대적으로 높아 처리구의 손실률이 높았고, 상대적으로 적은 유기태의 경우는 대조구에서 손실률이 높은 것으로 나타났다.

결론적으로 처리구별로 약간의 차이는 있으나 탄화 바이오매스 사용은 미생물에 의한 분해저항성을 갖는 탄소 형태로 공급하여 유기태 탄소 손실률을 줄이는데 역할을 하였다고 볼 수 있다 (DeLuca et al., 2009; Lehmann, 2009). 따라서 탄화 바이오매스를 공급하는 것은 탄소함량 증대 (Lehmann et al., 2006)와 더불어 유기태 탄소 분해를 저감할 수 있어 토양 내 탄소축적 및 온실가스 발생 저감에도 기여할 것으로 판단된다.

수확기 콩 수량 농업부산물 탄화 바이오매스 처리에 따른 콩 파종 후 113일의 수확기 콩 수량은 Fig. 2와 같다. 처리구별 콩 수량은 대조구, C-1, C-2 그리고 C-3 처리구에서 각각 476.9, 500.3, 527.3, 453.6 kg 10a⁻¹로 나타났다

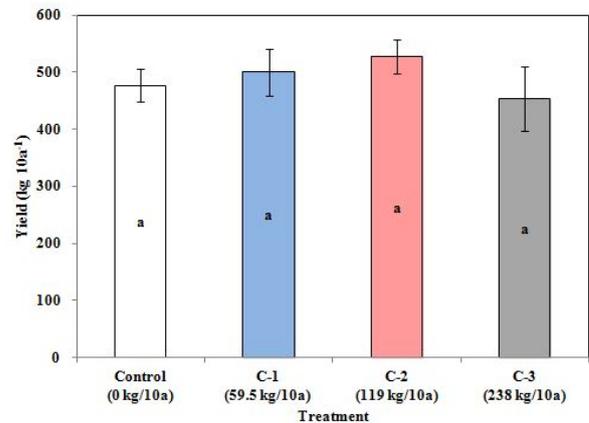


Fig. 2. Seed yield of soybean after 113 days after treatment. Vertical bars are standard errors of the means (n=3). Data followed by the same letter are not statistically different at $\alpha=0.05$.

나 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 위의 결과에서 처리별 토양내 탄소 축적량 및 콩 수량 측면에서 보면, 탄소 바이오매스 100% 처리구에서 가장 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 살펴볼 때 농경지에서 탄화 바이오매스 투입으로 토양개량 효과와 더불어 작물 수량을 증대시킬 수 있다는 보고 (Chan et al., 2008)도 있지만, 작물특성과 원료물질, 그리고 시험장소 등에 따라 사용 효과의 차이가 발생되므로 (Jones et al., 2011) 이에 대한 종합적인 연구 검토가 필요하다고 생각된다.

Conclusions

농업부산물 유래의 탄화 바이오매스 처리효과를 구명하기 위하여 콩 재배기간 동안의 토양 pH, 수분함량, 탄소함량 및 콩 수량을 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

토양의 pH 값은 6.8~7.5 범위로 파종 후 기간이 경과될수록 높아졌으며, 시용량이 많을수록 높은 경향을 보였다. 토양의 수분함량도 무처리에 비해 탄화 바이오매스 처리로 약간의 높은 경향 (0.1~1.5%)을 보였으나 시기별로는 일정한 경향이 없었다. 토양의 탄소 함량은 탄화 바이오매스 처

리구에서 파종 후 15일에 무처리와 비교하여 총 탄소 및 유기태 탄소의 평균 함량이 각각 24%, 15% 정도 증가하였다. 수확기의 토양 중 탄소 함량은 생육초기 (파종 후 15일)와 비교하여 통계적으로 유의성 있게 감소하는 것으로 나타났다. 총 탄소 손실률을 보면, 토양 총 탄소는 대조구 1.5%, 처리구 9.1~15.1%였으며, 유기태 탄소 손실률은 대조구 7.16%, 처리구 1.1~6.8%로 나타났다. 콩 수량은 대조구 476.9 kg 10a⁻¹, 바이오매스 처리구 453.6~527.3, kg 10a⁻¹로 나타났으나 처리구간 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다.

References

- Ascough P.L., C.J. Sturrock, and M.I. Bird. 2010. Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass. *Isotopes Environ. Health Stud.* 46:64-77.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald, and N.A. Hips. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from bio-char application to temperate soils: a review. *Plant and Soil.* 337:1-18.
- Chan Y.K., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2008. Using poultry litter biochar as soil amendments. *Aust. J. Soil Res.* 46:437-444.
- DeLuca T., M. MacKenzie, and M. Gundale. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations, p. 251-285. In: J. Lehmann S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management: Science and technology.* Earthscan London.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis, p. 383-412. In: G.S. Campbell et al. (ed.). *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Jones, D.L., D.V. Murphy, M. Khalid, W. Ahmad, G. Edwards-Jones, T.H. DeLuca. 2011. Short-term biochar induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biol. Biochem.* 43:1723-1731.
- Larid, D. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agron. J.* 100:178-184.
- Larid, D., P. Fleming, B.Q. Wang, R. Horton, and D. Karlen. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma.* 158:436-442.
- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review. *Mitig. Adapt. Strategies Global Change.* 11:395-419.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5:381-387.
- Lehmann, J. 2009. Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach. *Climate Change.* 97:459-463
- Mathews, J.A. 2008. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy.* 36:940-945.
- NAAS. 2000. *Methods of soil and plant analysis.* National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NAAS. 2013. *Soil testing for major crops,* National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nichols G.J., J.A. Cripps, M.E. Collinson and A.D. Scott. 2000. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: Results and implications. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.* 164:43-56.
- Park, W.K., N.B. Park, J.D. Shin, S.G. Hong, and S.I. Kwon. 2011. Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector. *Korea J. Environ. Agric.* 30:252-260.
- Roberts, K.G., B.A. Gloy, S. Joseph, N.R. Scott, and J. Lehmann, 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environ. Sci. Technol.* 44:824-833.
- Schneider, U.A., and B.A. MaCarl. 2003. Economic potential of biomass based fuels for greenhouse gas emission mitigation. *Environ. Resour. Econ.* 24:291-312.
- Singh, B.P., A.L. Cowie, and R.J. Smernik. 2012. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environ. Sci. Technol.* 46:11770-11778.
- Wang, J., L. Zhu, Y. Wang, S. Gao, and G. Daut. 2012. A comparison of different methods for determining the organic carbon and inorganic carbon content of lake sediment from two lakes on the Tibetan Plateau. *Quaternary International.* 250:49-54.
- Zhang, X., S. Kondragunta, C. Schmidt, and F. Kogan. 2008. Near real time monitoring of biomass burning particulate emissions (PM_{2.5}) across contiguous United States using multiple satellite instruments. *Atmospheric Environment.* 42:6959-6972.