

산도를 조절한 왕겨 바이오차와 어분 혼합물을 처리한 토양 침출수의 양분용출 패턴

최재이^a, 이동건^a, 김민정^b, 남주희^c, 심창기^d, 홍승길^e, 신중두[†]

Major plant nutrient-releasing patterns in the leachates from the soil incorporated rice hull biochar adjusted pH with dry fish powder

Jae-Lee Choi^a, DongKeon Lee^a, MinJeong Kim^b, JooHee Nam^c,
ChangKi Shim^d, SeungGil Hong^e, JoungDu Shin[†]

(Received: Aug. 10, 2023 / Revised: Aug. 29, 2023 / Accepted: Aug. 29, 2023)

ABSTRACT: This batch experiment was conducted to investigate the patterns of major plant nutrients in the leachates from the soil that was incorporated with rice hull biochar adjusted pH with dry fish powder utilizing rice hull biochar for loading the soil microorganisms. The rice hull biochar adjusted pH between 6.0 and 7.0, and the mixture ratio of rice hull biochar and dry fish powder was 4:6. The treatments consisted of three; the soil incorporated with rice hull biochar non-adjusted pH with dry fish powder as control (RB + DF), the soil incorporated with rice hull biochar adjusted pH by pyrolygneous acid solution and dry fish powder (RBP+DF), and the soil incorporated with rice hull biochar adjusted pH by citric acid solution and dry fish powder (RBC+DF). NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P, and K concentrations in the leachates were analyzed during incubation. The accumulated NH₄-N and PO₄-P concentrations in the leachates from the RBC+DF treatment were the highest during leaching periods. The highest accumulated NO₃-N and K concentrations in the leachates from the RBP+DF treatment were observed. It observed that NH₄-N and PO₄-P were more released in the adjusted citric acid solution, but NO₃-N and K were less released than those in the pyrolygneous acid solution due to their low absorption capacity. Furthermore, it is necessary to investigate crop growth responses to the soil incorporated with adjusted pH rice hull biochar and dry fish powder for loading soil microorganisms.

Keywords: citric acid, pyrolygneous acid, dry fish powder, leachate, rice hull biochar

초 록: 본 연구의 목적은 바이오차를 미생물 담체로 활용하기 위해 pH 조절제로서 구연산과 목초액을 각각 처리한 왕겨 바이오차와 어분을 혼합한 토양 침출수의 양분 용출 패턴을 구명하기 위해 수행하였다. 왕겨 바이오차 pH 6.0~7.0

^a 전북테크노파크 전북과학기술센터 다학바이오텍 연구원(Researcher, Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co., JBTP R&D Center)

^b 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과 연구원(Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^c 경기도농업기술원 친환경미생물연구소 연구사(Researcher, Environment-Friendly Microorganism Research Institute, Gyeonggi-Do Agricultural Research and Extension Service)

^d 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과 연구관(Senior Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration)

^e 농촌진흥청 디지털농업추진단 연구사(Researcher, Department of Digital agriculture, Rural Development and Administration)

^f 전북테크노파크 전북과학기술센터 다학바이오텍 대표(CEO, Bio-technology of Multidisciplinary Sciences, Co., JBTP R&D Center)

† Corresponding author(e-mail: jdshin61@gmail.com)

와 어분을 혼합비(4:6)로 조제하였다. 본 실험의 처리는 산도를 조절하지 않은 바이오차 처리한 토양을 대조구(RB+DF), 목초액으로 산도 조절한 왕겨 바이오차와 어분의 혼합물(RBP+DF)을 처리한 토양, 구연산으로 산도 조절한 왕겨 바이오차와 어분의 혼합물(RBC+DF)을 처리한 토양 3 수준으로 구성되어 있다. 왕겨 바이오차와 어분을 혼합한 토양 침출수 중에 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, K의 농도를 분광계를 이용하여 분석하였다. 실험 결과로서 RBC+DF 처리한 토양의 침출수 중에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 누적함량은 가장 높았고, 또한 RBP+DF를 처리한 토양의 침출수에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 K의 누적함량은 가장 높게 나타났다. 대조구에 비해 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 구연산으로 산도를 조절한 왕겨 바이오차를 처리한 토양의 침출수에서, $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 K는 목초액으로 조절한 왕겨 바이오차 처리한 토양의 침출수에서 각각 흡착능이 낮아 더 많이 용출되는 것으로 관측되었다. 따라서, 미생물 담체로서 산도를 조절한 왕겨 바이오차의 시용에 따른 작물 생육 반응에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

주제어: 구연산, 목초액, 어분, 용출, 왕겨 바이오차

1. 서론

현대 농업은 생산력 향상을 위해 화학비료 및 농약, 농기계 등 영농투입재를 무분별하게 사용하여 농업생태계의 환경 문제를 야기시키고 있다. 최근 사회의 발전과 소비자들의 요구가 확대되면서 유기농 재배에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다¹⁾. 생산성 향상을 위해 유기 합성농약과 화학비료를 중심으로 작물 재배를 하는 관행적인 방법과 달리 유기농업은 안전한 농산물을 생산하고, 지속 가능한 농업을 위해 잔류성이 없고, 유기농업자재로 허용 가능한 퇴구비, 풋거름 작물 등을 활용하여 최소한의 농자재 투입으로 작물을 재배하고 토양을 관리하는 농법이다. 배추과 작물을 재배하는 농가 토양의 화학성을 분석한 결과 유기 농법으로 경작한 토양은 유기물의 분해 과정 중 생성되는 수용성 산들이 토양의 pH를 감소시켜 관행농업에 pH가 더 낮게 나타나는 경향을 보였다²⁾. 유기농 재배면적은 1990년대 후반부터 확대되었으며³⁾, 국립농산물품질관리원에 따르면 10년간 유기농산물의 연평균 36.4%의 증가율을 보여준다고 보고되었다⁴⁾. 작물의 수량을 높이기 위해 작물이 필요로 하는 만큼 양분을 땅에 넣어주어야 하지만⁵⁾, 토양의 질은 농산물 생산성, 자원 공급 및 인간 건강에 대한 전반적인 지속 가능한 농업 시스템에 큰 영향을 미칠 수 있다⁶⁾. 그 밖에도 토양은 물 순환의 주요 요소이며 토양을 이루는 요소 중 하나인 토양 공극을 물리적인 방법으로 확보하는 방법은 숯과 같은 다공성 물질을 이용하는

것이 적당하다. 즉 유기물은 양분저장능력, 완충능력 증대, 토양 입단화 형성 등 토양의 이화학적 성질 개선에 중요한 기능을 가진다.

식물이 유기물을 이용하기 위해서는 유기물이 분해되어야 하는데 이때 분해속도는 토양온도, 토양수분, 토양미생물, 유기자원의 탄소함량, 질소함량, 토양 pH 등 다양한 요인으로 작용함에 따라 작물에 따른 적절한 시기에 양분을 제공하는데 이용율이 달라지게 된다⁷⁾. 현재 친환경 농산물 생산을 위해 농약 사용 대신 부산물 퇴비, biochar 등 토양오염을 최소화하며 양분 공급이 좋은 친환경 유기농업자재의 사용이 증가하고 있다. 부산물 퇴비는 친환경 농업에 있어 토양 유기물을 공급하고 여러가지 미량 원소를 포함하며, 미생물 생육에 유리하다는 점에서 유기자원 중 하나로 평가받고 있으며⁸⁾, 부산물퇴비의 양분함량을 고려한 사용량 결정을 위해 시용할 퇴비의 화학성분량을 고려해야한다. 또한 NH_3 저감을 목적으로 토양의 pH를 7이하로 낮추거나 유기질 퇴비를 사용하는 다양한 방법을 제시하였지만 경제성이 낮고 환경오염을 유발할 수 있기에 새로운 방안을 찾아야 할 필요성이 있다⁹⁾. 이때 목초액은 목재 바이오매스를 열 분해하는 과정에서 발생하는 연기를 액화하여 채취한 액체이며 주로 식물생장 촉진, 미생물 증식 효과 등 농업적으로 다양한 효과가 있는 것으로 밝혀졌다¹⁰⁾. 토양에 처리된 목초액은 토양 pH 조절 및 NH_4^+ 손실 억제, N_2O 및 NH_3^+ 배출 완화, 토양 미생물의 활성증진 등 긍정적인 효과가 있음이 밝혀졌다¹¹⁾. 토양에서의 NH_3^+ 배출은

pH와 밀접한 연관이 있으며, 토양의 pH 7.0 이하일 경우에는 NH_4^+ 형태로 토양 내에 존재하지만, pH가 7.0 이상이 되면 토양내 NH_4^+ 가 OH^- 와 반응하여 NH_3 로 대기 중으로 배출된다¹²⁾. 한편 유기농업자재인 목초액을 농도별 처리에 따른 토마토의 초기생육 연구 결과 대조구에 비해 토마토의 생육과 수량이 다소 높게 나왔으며 토양 미생물 양이 증가함에 따라 토마토 근권의 미생물이 활성화되어 작물생육 또한 양호해진다는 보고가 있다¹³⁾.

Biochar는 산소가 없는 환경에서 바이오매스를 열분해하여 얻어진 고형물이며, 산소가 부족한 상태에서 바이오매스를 약 300~800°C의 고온으로 열분해하여 만들어진 것이다¹⁴⁾. 가장 큰 장점으로는 탄소 격리기술에 적용되며, 온실가스배출 저감에 도움을 준다¹⁵⁾. 또한 토양에 바이오차를 시용하면, 높은 보수력을 통해 토양과 물의 정화가 가능하며, 높은 다공성으로 인해 토양의 통기성을 개선하고, 높은 양이온 치환 용량(CEC) 및 pH가 높아 산성 토양 미생물을 활성화해 작물 생육을 돕는다¹⁶⁾. 친환경 물질로 왕겨, 벼짚, 참나무, 계분 등 탄화물질로 농업부산물물을 소재로 활용할 수 있어 이들은 기후변화, 불안요인 및 화학비료를 대체하여 친환경 저탄소 녹색산업을 실현할 수 있으며 노동력 절감에 크게 기여하는 토양개량제¹⁴⁾로서 주목받고 있으나, 토양 및 제조특성에 따라 효과가 다르다고 보고되어 있다¹⁷⁾. 그 중 계분 퇴비를 시용한 노지 채소 재배 시, 양분 이용율은 질소, 칼리, 인산 순으로 많았으며, 계분 퇴비 시용량이 많을수록 질소함량이 증가되었다¹⁸⁾. 산성 토양은 양분의 유효도가 낮아지거나 양분의 과잉 용출로 인해 작물의 생육에 영향을 미칠 수 있어 이러한 토양에 바이오차를 시용하게 되면 긍정적인 영향으로 나타날 수 있다¹⁹⁾. 농경지 양분, 수용성 유기물질은 점토함량 및 유기물함량이 낮은 사양질 토양에서 상대적으로 강우 시 물에 양분이 녹아 용출된다고 보고되었으며 한편 흡착능력이 큰

바이오차가 이 토양에 처리될 경우 용출되는 양분을 줄일 수 있다고 보고한 바 있다²⁰⁾. 대부분 토양 교질의 표면 전하는 음(-)전하를 띠고 있어 식물영양소인 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ 등은 양이온으로서 토양의 음(-)전하와 결합하여 치환성 양분으로 이용할 수 있다²¹⁾.

토양개량과 작물생육을 위해서는 친환경 농어업 육성법에 명시된 재료 확보가 용이한 자원을 사용하는 것이 중요하며, 자재 종류로는 농축산부산물, 수산부산물인 어분, 식물성 유박, 구아노 등이 존재한다²²⁾. 그 중에서도 어분은 동물성 단백질 원료 중 하나로 필수 아미노산의 공급력이 우수할 뿐만 아니라 질소함량이 7~10%로 풍부하여 비료로 활용되고 있다²³⁾. 유기농업에서 양분 관리 방법은 토양 검정을 통해 작물에 필요한 양분을 시용하거나 유기물 공급 차원에서 접근하는데 이러한 산도 조절에 따른 유기농업자재의 양분 용출에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 pH 조절제로서 구연산과 목초액을 처리한 왕겨 바이오차와 어분을 혼합한 토양에서 양분 침출 패턴을 구명하기 위해 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 실험에 사용된 왕겨 바이오차는 전라북도 고창군에 있는 바이오차 제조사인 (주)유기산업에서 구매하였다. 전라북도 완주에 소재하고 있는 국립농업과학원 토양비료관리과 실험포장의 밭 토양을 채취하여 음건 후, 체(sieve, 2mm)에 걸러진 밭 토양을 사용하였다. 시험에 사용한 밭 토양의 이화학적 성분은 Table 1에 나타내었다.

본 시험에 사용한 토양은 pH 6.6으로 중성 토양이었으며, 유기물 함량은 적정 함량(25-35 g kg⁻¹) 보다 매우 낮으며, 인산 함량은 적정 함량(350-450 mg kg⁻¹)

Table 1. Physicochemical Properties in the Soil Used in this Study

| pH | EC (dS/m ²) | OM | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | K | Ca | Mg | Na |
|-----|----------------------------|-------|-------------------------------|------------------|------|-----|-----|------|
| | | mg/kg | | | | | | |
| 6.6 | 0.95 | 19 | 393 | 187 | 0.21 | 6.0 | 1.2 | 0.21 |

범위안에 있는 토양이었다(Table 1).

pH10인 기존 왕겨 바이오차는 산도를 조정하지 않을 경우 미생물 담체 소재로의 활용성이 낮아지므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 산도 조절제인 목초액과 Citric acid를 이용하여 pH 7.0 내외로 조절 후 어분과 4:6으로 혼합하여 이용하였다. 실험의 처리는 대조구로서 산처리를 하지 않은 왕겨 바이오차+어분(RB+DF)을 혼용한 토양, 목초액을 처리한 왕겨 바이오차+어분(RBP+DF)을 혼용한 토양, 구연산을 처리한 왕겨 바이오차+어분(RBC+DF)을 혼용한 토양으로 구성되어 있다. 본 실험 배치는 산도 조절한 왕겨 바이오차와 어분 혼합물 처리한 토양을 3수준으로 하여 3반복 완전임의 배치법을 이용하였다. 혼합물의 pH를 중성으로 조절하기 위해 목

초액 5배 희석 용액, 0.04 M 구연산 용액을 왕겨 바이오차에 살포하고 하루동안 충분히 흡수 및 건조시킨 후, 어분과 4:6비율로 혼합하였다. 혼합물의 이화학적 성분은 Table 2에 나타났다.

양분 용출능력 평가를 위해, 노지 배추 재배 시 질소 추천 시비량인 32 kg 10a⁻¹ 기준으로 산정하여 pH를 조절한 왕겨 바이오차 종류별로 어분과 섞은 혼합물과 토양 200g에 고르게 섞어 여과컵에 충전하였다(Fig. 1). 또한 침출 실험 과정에서 미세한 토양 입자로 인해 침출액의 막힘 현상을 방지하기 위해 Sea sand 5g씩 각각의 여과컵에 고르게 넣은 후 혼합물을 충전하였다. 각 처리에 대한 수분 유지를 위해 60% 포장 용수량을 구하고 휘발산량과 침출액을 산정한 후, 포장 용수량의 60%를 유지하기 위해

Table 2. Physicochemical Properties of Mixtures with Different Biochar Adjusted pH and Dry Fish Powder

| | pH | EC | TN | NH ₄ -N | PO ₄ -P | K |
|--------|--------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| | (1:20) | dS m ² | mg L ⁻¹ | | | |
| RBP+DF | 6.39 | 1.44 | 513.17 | 71.2 | 55.47 | 14.31 |
| RBC+DF | 6.18 | 1.46 | 470.55 | 47.70 | 63.94 | 13.40 |
| RB+DF | 6.38 | 1.40 | 509.57 | 64.33 | 53.72 | 14.80 |

RBP+DF; the mixtures (4:6) of rice hull biochar treated with pyroligneous liquor and dry fish powder, RBC+DF; the mixtures (4:6) of rice hull biochar treated with citric acid and dry fish powder, RB+DF; the mixtures (4:6) of rice hull biochar and dry fish powder.

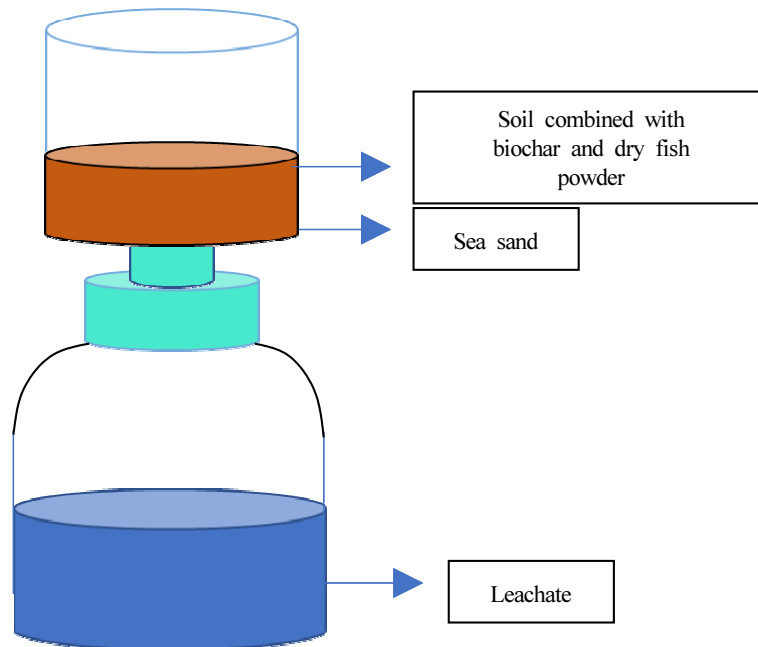


Fig. 1. Diagram of porous cup used in this leaching experiment.

5일 간격으로 1회 같은 시간대에 지속적으로 증류수를 보충하여 토양 수분 함량을 유지하였다. 토양 침출수에 대한 이화학 성분을 분석하기 위한 용액 20 ml을 채취하였다.

토양 침출수의 화학성분은 토양화학분석법을 적용하여²⁴⁾, pH와 EC(electrical conductivity)는 1:20(혼합물: 증류수, wt. %) 비율로 혼합하여 실온에서 왕복식 항온 진탕기의 교반 속도 140 rpm으로 30분 진탕 후 pH/EC meter를 이용하여 측정하였다. 용출액에 대한 주요 양분 분석은 용출액을 여과지(Whatman #2)로 여과한 후 UV Spectrophotometer 사용하여 측정용 키트(ST-Ammonium, C-Mac, Korea)로 분석하였다. NO₃-N는 Chromotropic acid, NH₄-N는 Salicylate, PO₄-P는 molybdovanadate, K은 Tetraphenylborate 방법으로 분석하였다.

처리 간에 유의차를 분석하기 위해 Excel program을 이용한 표준편차를 구하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

바이오차를 미생물 담체로 사용하기 위해 pH 조절제인 구연산과 목초액을 처리한 바이오차와 어분을 혼합하였을(pH 6.0~7.0) 경우 토양 침출수의 양분 용출 패턴을 보고자 하였다. 식물이 생육하는데 있어 NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻는 중요한 질소 성분으로 발효 양은 표면이 대기와 접촉하고 있어 산화조건에 있기 때문에 산화물인 NO₃⁻, SO₄²⁻가 존재한다. 토양중의 NH₄⁺는 유기물로부터 질산화작용을 통해 용탈되기 쉬운 NO₃⁻로 산화되고 토양에 흡착 및 휘산되며, 탈질작용으로 인해 온실가스인 N₂O 또는 N₂ 가스로 배출된다²⁵⁾. 토양에 사용한 질소의 45%~60%의 질소가 유실되므로, 질산화를 억제할 수 있는 방법을 찾아야 할 필요성이 있다고 하였다²⁶⁾. 음이온인 NO₃⁻는 토양 내에서 잔류하기 어려워 흡착되지 못하고 쉽게 용탈 되기도 하며 탈질작용으로 인해 소실된다²⁷⁾. 따라서 토양 침출수의 양분 용출 패턴을 알아보기 위한 실험 결과로서, 대조구인 RB+DF를 처리한 토양의 용출액 중에 NH₄-N 농도는 15일에 18.41 mg L⁻¹까지 증가했으며 20일차부터 점차 하락하는 경향

이었다. NH₄-N 농도는 실험 초기에 모든 처리구에서 급격히 증가하다가 15일을 기점으로 점차 낮아지는 경향을 보였다. 처리구별 최대 농도는 RBC+DF>RBP+DF>RB+DF 순으로 높게 나왔다(Fig. 2A). RB+DF를 처리한 토양의 침출액 중의 NH₄-N 누적함량은 78.39 mg L⁻¹로 산도를 조절한 왕겨 바이오차와 어분의 혼합물을 처리한 토양에 비해 27%~30% 정도 현저히 낮은 농도로 침출 되었다. 처리구별 최대 농도에 비례하여 NH₄-N 누적함량의 수치 또한 RBC+DF>RBP+DF>RB+DF 순으로 높게 나왔다. 실험 후 20~25일 기점으로 NH₄-N 누적함량은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 2B).

산도 조절제를 처리한 바이오차와 어분을 혼용한 토양 침출액 중의 NH₄-N의 농도가 증가하였으며, 이는 왕겨 바이오차의 산처리가 NH₄-N 흡착능을 저해하는 것으로 판단된다. 또한 구연산을 처리한 왕겨 바이오차 보다는 목초액을 처리한 왕겨 바이오차가 NH₄-N가 덜 침출 됨에 따라 구연산 처리가 왕겨 바이오차의 NH₄-N 흡착에 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 바이오차의 흡착능은 바이오차의 pH, 투입량, 온도 등에 의해 영향을 받는다고 발표된 바 있으며, 본 연구결과도 바이오차의 pH를 산도조절제 종류별로 조절함에 따라 pH 조건이 양분 흡착능에 차이를 준 것으로 해석된다²⁸⁾.

대조구로서 RB+DF 처리한 토양 침출액 중의 NO₃-N 최대 함량은 130.77 mg L⁻¹으로 40일을 기점으로 감소하는 추세이며 24.91 mg L⁻¹으로 가장 낮은 농도로 관측되었다. RBP+DF를 처리한 토양 침출액 중의 NO₃-N의 함량은 용출 후 30일에 202.44 mg L⁻¹로 대조구에 비해 높게 나타났으며 30일을 정점으로 다른 높아졌다가 점차 낮아졌다. NO₃-N 최대함량은 RBC+DF 처리에서 215.05 mg L⁻¹으로 처리구 사이에서 가장 높게 나타났으며, 최소 농도는 25.95 mg L⁻¹으로 대조구인 RB+DF를 처리한 토양 침출액의 농도와 일치하였다(Fig. 3A). 누적 NO₃-N의 함량은 RBP+DF를 처리한 토양으로부터 침출액에서 1380.06 mg L⁻¹로 가장 높은 농도로 용출되었으며 RBC+DF 처리한 토양에서는 1123.74 mg L⁻¹ 용출되었다. NO₃-N 용출 농도는 대조구인 RB+DF를 처리한 토양 보다 산도 조절한 RBP+DF 처리한 토양 침출액에서 41.2%,

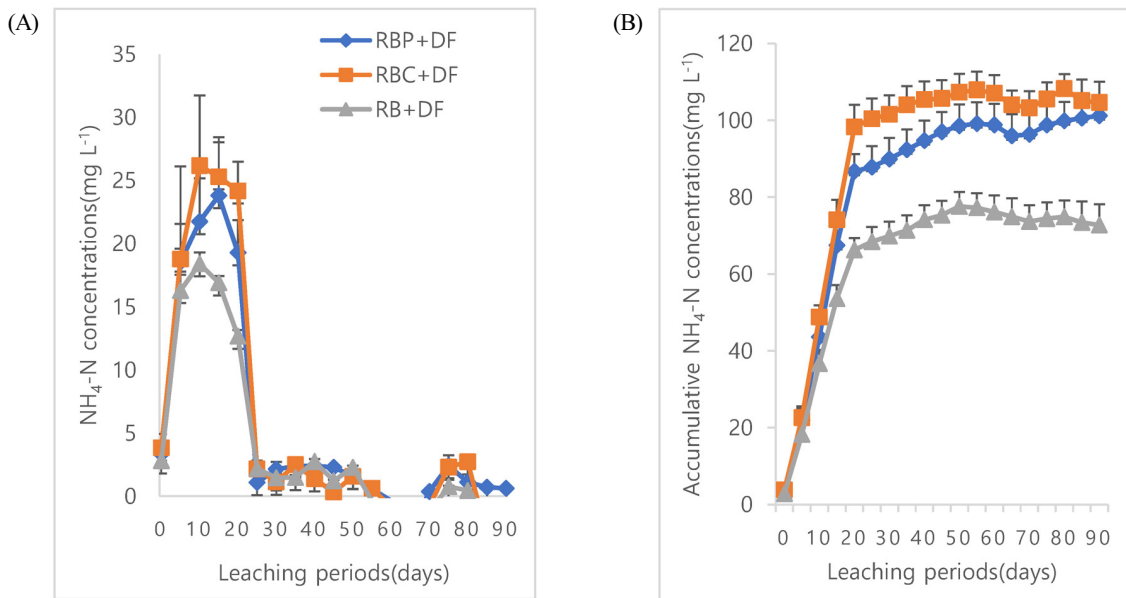


Fig. 2. $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations in leachates from the treatments; (A) $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations and (B) cumulative $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations. The leachates from RBP+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar treated with pyrolygneous liquor and dry fish powder, the leachates from RBC+DF; the leachates from the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar mixture treated with citric acid and dry fish powder, RB+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar and dry fish powder.

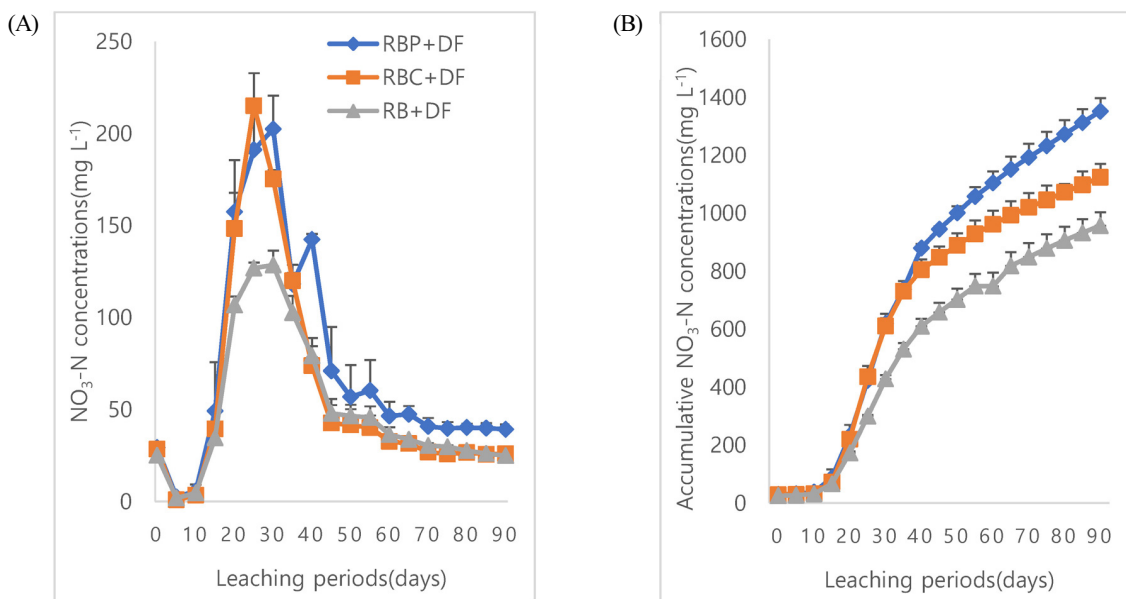


Fig. 3. $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in leachates from the treatments; (A) $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations and (B) cumulative $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations. The leachates from RBP+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar treated with pyrolygneous liquor and dry fish powder, the leachates from RBC+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar mixture treated with citric acid and dry fish powder, and the leachates from RB+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar and dry fish powder.

RBC+DF를 처리한 토양 침출액은 17.5% 정도 더 높은 농도를 보였다(Fig. 3B).

질소비료를 바이오차와 함께 사용하였을 시 바이오차의 투입량이 증가할수록 질산화를 감소시켜 NO₃-N의 농도를 감소시킨다고 보고하였지만²⁹⁾, 바이오차를 산도처리제를 이용하여 산도를 중성으로 낮추었을 경우 오히려 NO₃-N의 농도를 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 바이오차를 온도별로 제조하여 NH₄-N와 NO₃-N의 흡착 특성을 알아보는 연구 결과, NH₄-N은 높은 온도에서 생성된 바이오차보다 낮은 온도일 때 흡착량이 더 높게 나타나 낮은 용출을 보인 반면 NO₃-N에서는 오히려 더 많이 용출되는 현상이 나타났다고 보고한 바 있다³⁰⁾.

바이오차 종류별로 혼용한 토양 침출액 중에 PO₄-P 농도 및 누적함량을 Fig. 4에 나타냈다. RB+DF처리한 토양의 침출액 중에 PO₄-P농도는 용출 시험 첫 날이 2.45 mg L⁻¹로 가장 낮으며 RBP+DF 및 RBC+DF 처리에서 각각 2.68 mg L⁻¹, 5.14 mg L⁻¹으로 대조구보다 높게 나온 것을 알 수 있다(Fig. 4A). PO₄-P는 농도와 비례하여 누적 농도 또한 RBC+DF > RBP+DF > RB+DF

순으로 RBC+DF처리한 토양의 침출액(19.72 mg L⁻¹)에서 가장 높게 나타났다(Fig. 4B). 왕겨 바이오차의 산도 조절에 따라 인의 함량은 증가하는 것으로 나타났다는데, 이는 특히 구연산 처리가 왕겨 바이오차의 PO₄-P의 흡착능을 저해시키는 것으로 생각된다. *T. dealbata*에서 추출한 바이오차에 의한 PO₄-P 최대 흡착량은 2.54-4.96 mg/g으로 생성온도가 증가할수록 최대흡착량이 증가하였다고 보고하였다³¹⁾.

바이오차 종류별 처리한 토양 침출액 중에 K의 평균농도 및 누적 농도를 Fig. 5에 나타냈다. K의 농도 변화를 보면, 용출 기간 20일을 기점으로 RB+DF, RBP+DF, RBC+DF의 처리구에서 각각 1.56 mg L⁻¹, 1.87 mg L⁻¹, 1.9 mg L⁻¹로 최대 농도를 보였다. K의 농도는 용출 후 25-65일동안 모든 처리구에서 점차적으로 낮아지는 경향을 보였으며, 70일 기점으로 농도 변화가 거의 없었다(Fig. 5A). K의 누적함량 그래프를 보면 대조구인 RB+DF처리한 토양 침출액 중에 K의 누적함량은 14.58 mg L⁻¹로 산도 조절한 왕겨 바이오차를 처리한 토양과 비교하였을 때 BP+DF 처리의 누적함량은 17.22 mg L⁻¹, RBC+DF를 처리한

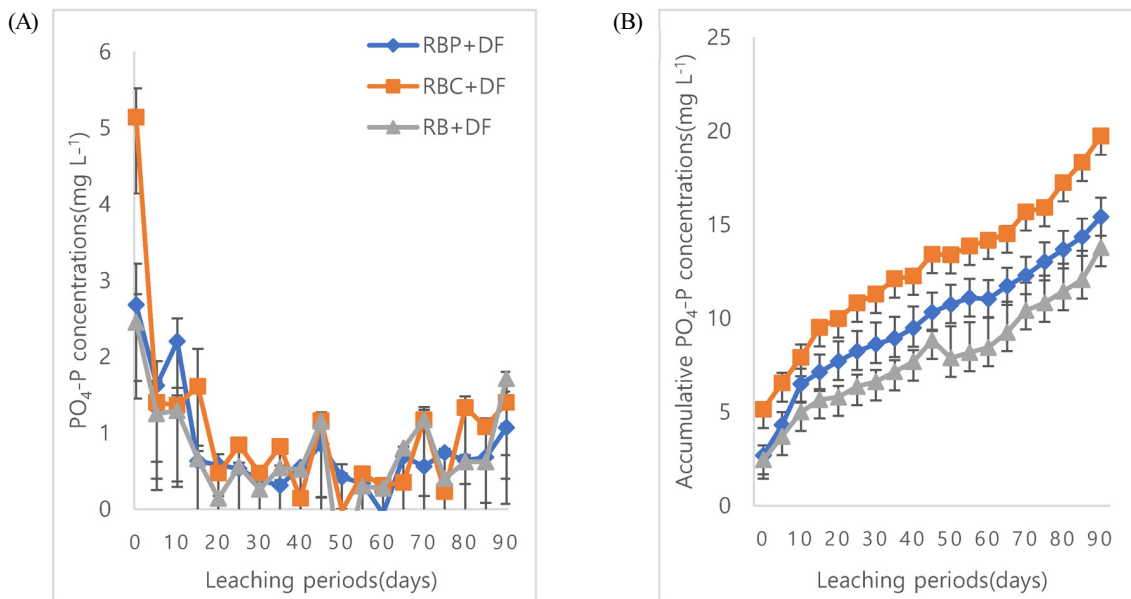


Fig. 4. PO₄-P concentrations in the leachates from the treatments; (A) PO₄-P concentrations and (B) cumulative PO₄-P concentrations. The leachates from RBP+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar treated with pyrolygneous liquor and dry fish powder, the leachates from RBC+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar mixture treated with citric acid and dry fish powder, and the leachates from RB+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar and dry fish powder.

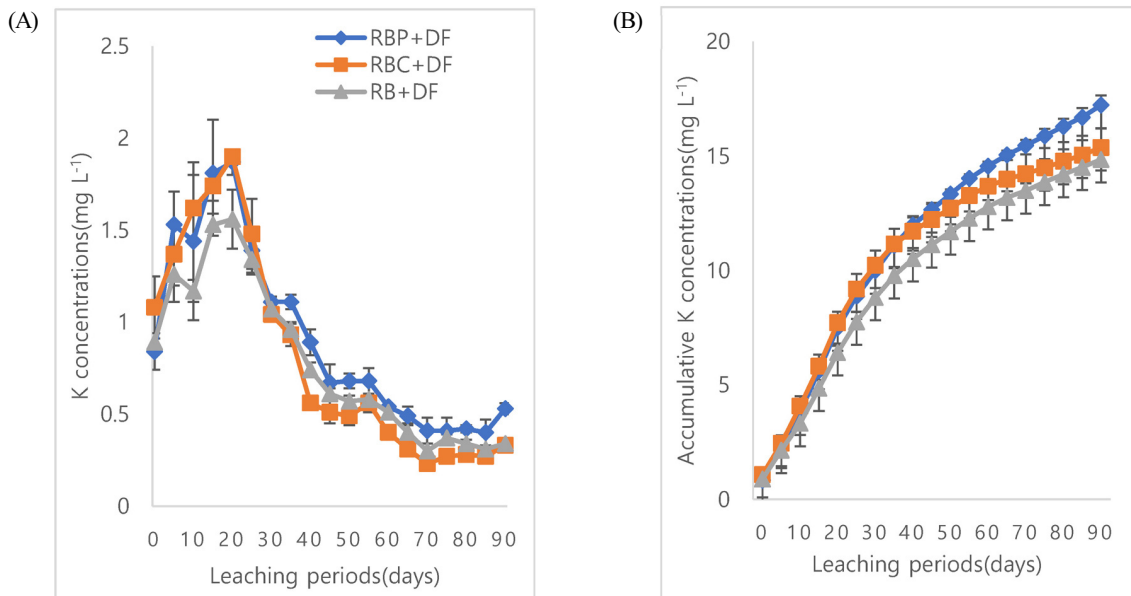


Fig. 5. K concentration in the leachates from the treatments. (A) K comparison and (B) cumulative K concentrations. The leachates from RBP+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar treated with pyroligneous liquor and dry fish powder, the leachates from RBC+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar mixture treated with citric acid and dry fish powder, and the leachates from RB+DF; the soil incorporated (4:6) with rice hull biochar and dry fish powder.

토양의 침출액 중에서 15.37 mg L⁻¹로 대조구에 비해 각각 16%, 3.5% 정도 높았다(Fig. 5B).

전반적으로 왕겨 바이오차의 pH를 중성으로 낮출 경우 양분 흡착능이 저하되고, 양분 용출이 높아짐에 따라 미생물 담체로 활용하기 위해, 경작지에서 산도를 조절한 왕겨 바이오차를 활용한 작물 생육 반응 연구가 수반되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 왕겨 바이오차를 미생물 담체로 이용하기 위해 산도 조절된 왕겨 바이오차와 어분 혼합물을 처리한 토양 침출수 중의 양분 용출 패턴을 구명하기 위해 수행하였다. 토양 침출액 중의 NH₄-N의 농도 및 누적함량은 RBC+DF > RBP+DF > RB+DF 순으로 높게 나타났으며, RB+DF처리에 비해 RBC+DF 처리에서 42%, RBP+DF처리에서 37.4% 더 높게 나타났다. NO₃-N의 누적함량은 RBP+DF > RBC+DF > RB+DF 순으로 RB+DF처리에 비해 RBP+DF처리에

서 41.2%, RBC+DF처리에서는 17.5% 높은 농도를 보였다. PO₄-P 농도의 경우 RBC+DF처리에서 19.7 mg L⁻¹로 대조구에 비해 37.5% 높게 나타났으며, K 농도의 경우 RBP+DF처리에서 17.2 mg L⁻¹로 대조구에 비해 16% 높게 나타났다. 산도를 중성으로 조절한 왕겨 바이오차에서 낮은 양분 흡착능으로 산도 조절을 하지 않은 대조구에서 보다 양분이 높은 농도로 용출되는 것을 보였다. 이 연구결과를 토대로 향후 산도를 조절한 왕겨 바이오차와 어분의 혼합물을 펠렛화하여 유기농경지에 시비할 경우 배추과 작물의 생육과 토양 미생물의 밀도변화에 어떠한 영향을 미치는지 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구과제 (Project NO. PJ01705803)로 수행되었음을 감사하게 생각합니다.

References

1. Park, J.-S., Cho, W.-J. and Kim, W.-S., "Selection and Control Effect of Environmental Friendly Organic Materials for Controlling The Main Disease of Yuzu (*Citrus junos* Sieb)", *Korean J. Org. Agri.*, 22(1), pp. 115~127. (2014).
2. Oh, T.-S. and Kim, C.-H., "Effect of Using Organic Fertilizer on the Growth of Rice and Soil", *Korean J. Crop Sci.*, 58(1), pp. 36~42. (2013).
3. Han, M.-S., Nam, H., Kang, K.-K., Kim, M., Na, Y.-E., Kim, H. R. and Kim, M.-H., "Characteristics of Benthic Invertebrates in Organic and Conventional Paddy Field", *Korean J. Envi. Agri.*, 32(1), pp. 17~23. (2013).
4. Lim, J.-S., Lee, B.-H. and Kang, S.-H., "Estimation of Nitrogen Mineralization of Organic Amendments Affected by Nitrogen Content in Upland Soil Conditions", *Korean J. Envi. Agri.*, 38(4), pp. 262~268. (2013).
5. Abrahams, P. W., "Soils: their implications to human health", *Sci. Total Environ*, 291, pp. 1~32. (2013).
6. Sohn, S.-M., Han, D.-H. and Kim, Y.-H., "Chemical characteristics of Soils Cultivated by the Conventional Farming, Greenhouse Cultivation and Organic Farming and Accumulation of NO_3^- in Chinese Cabbage and Lettuce", *Korean J. Org. Agri.*, 5(1), pp. 149~165. (1996).
7. An, N.-H., Cho, J.-R., Lee, S. and Nam, H.-S., "Assessment of Soil Properties and Growth of Organically Cultivated Cucumber (*Cucumis sativus* L.) with Applications of Livestock Manure Compost and Fish Meal Liquid Fertilizer", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 26(3), pp. 23~31. (2018).
8. Kim, D.-J., Ahn, B.-K. and Lee, J.-H., "Impact of Environmentally friendly Organic Agro-Materials on Chemical Properties of Remediated Soils", *Korean J. Org. Agri.*, 21(4), pp. 753~767. (2013).
9. Kang, Y.-G., Lee, J.-H., Chun, J.-H., Yun, Y.-U., Oh, T.-K. and Sung, J.-K., "Evaluation of NH_3 emissions in accordance with the pH of biochar", *Agricultural Science Research*, 48(4), pp. 787~796. (2021).
10. Jeong, J.-H., Jeong, D.-E., Lee, S.-J., Seul, K.-J., Ryul, C.-M., Park, S.-H. and Ghim, S.-Y., "The effect of pasture fluid on the growth and disease resistance of peppers", *J. Micro. and Biotech.*, 35(1), pp. 41~44. (2007).
11. Lashari, M.-S., Ye, Y., Ji, H., Li, L., Kibue, G.-W., Lu, H., Zheng, J. and Pan, G., "Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a 88aline soil from central China: A 2-year field experiment", *J. Sci. Food Agri.*, 95, pp. 1321~1327. (2015).
12. Park, S.-Y., Choi, H.-Y., Kang, Y.-G., Park, S.-J., Luyima, D., Lee, J.-H. and Oh, T.-K., "Evaluation of ammonia (NH_3) emissions from soil amended with rice hull biochar", *Agricultural Science Research*, 47(4), pp. 1049~1056. (2020).
13. Jeong, S.-J., Oh, J.-S., Seok, W.-Y., Kim, J.-H., Kim, D.-H. and Chung, W.-B., "Effect of Chitosan, Wood Vinegar and EM on Microorganisms in Soil and Early Growth of Tomato", *Korean J. Org. Agri.*, 14(4), pp. 433~443. (2006).
14. Kim, H., Yun, S., Jang, E. and Shin, J., "Investigation of an Optimum Application Rate of Blended Biochar Pellet as Slow-Release Fertilizer during Cabbage Cultivation", *J. Korea Org. Resoc. Recyc. Asso.*, 27(1), pp. 49~56. (2019).
15. O'Laughlin, J. and McElligott, K., "Biochar for environmental management: science and technology", J. Lehmann and S. M. Joseph, Eds., Earthscan, London UK, p. 448. (2009).
16. Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y. and Zhang, W., "Past, present, and future of biochar", *Biochar*, 1, pp. 75~87. (2019).
17. Jang, J.-E., Lim, G.-J., Park, J.-S., Shim, J.-M., Kang, C.-S. and Hong, S.-S., "Application Effects

- of Biochar Derived from Pruned Stems of Pear Tree on Growth of Crops and Soil Physico-chemical Properties”, J. Korean Org. Resoc. Asso., 26(4), pp. 11~19. (2018).
18. Kim, J.-G., Lee, K.-B., Lee, D.-B., Lee, S.-B. and Kim, S.-J., “Effect to Chicken Manure Compost Application on the Growth of Vegetables and Nutrients Utilization in Upland Soil”, Korean J. Soil Sci., 31(2), pp. 177~182. (1998).
 19. Park, D.-G., Hong, S.-G., Jang, E. and Shin, J.-D., “Assessment of an Optimum Biochar Application Rate for Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivation”, J. Korean Org. Resoc. Recyc. Asso., 27(1), pp. 39~48. (2019).
 20. Han, K.-H., Zhang, Y.-S., Jung, K.-H., Cho, H. and Sonn, Y.-K., “Evaluating germination of lettuce and soluble organic carbon leachability in upland sandy loam soil applied with rice husk and food waste biochat”, Agricultural Science Research, 41(4), pp. 369~377. (2014).
 21. Lee, D.-G., Lee, S. E., Kim, D. H., Hong, H. K., Nam, J. H. and Choi, J.-S., “Moon Soon Lee, Sun Hee Woo, Keun-Yook Chung. Effects of the Applications of Clay Minerals on the Early Growth of Red Pepper in Growing Medium”, Korean J. Hor Sci. & Tech., 30(4), pp. 463~470. (2012).
 22. An, N.-H., Lee, S., Cho, J.-R., Lee, C.-R. and Kong, M., “Effect of Liquid Fertilizer Application using Fishmeal, Bonemeal and Sesame oil-cake on Seed Germination and Growth of Tomato”, J. Korean Org. Resoc. Recyc. Asso., 27(4), pp. 61~70. (2019).
 23. An, N.-H., Cho, J.-R., Gu, J.-S. and Kim, S.-C., “Comparison of Physico-Chemical Properties of Organic Liquid Fertilizer Containing Fish Meal According to Manufacture Method”, J. Korean Org. Resoc. Recyc. Asso., 24(3), pp. 91~99. (2019).
 24. NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology), “Methods of soil chemical analysis”, Suwon, Korea. (2010).
 25. Park, D.-G., Hong, S.-G., Jang, E. and Shin, J.-D., “Assessment of an Optimum Biochar Application Rate for Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivation”, J. Korean Org. Resoc. Recyc. Asso., 27(1), pp. 39~48. (2019).
 26. Abbasi, M.-K., Hina, M. and Tahir, M.-M., “Effect of *Azadirachta indica* (neem), sodium thiosulphate and calcium chloride on changes in nitrogen transformations and inhibition of nitrification in soil incubated under laboratory conditions”, Chemosphere, 82, pp. 1629~1635. (2011).
 27. Lee, S.-G., “Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions and Soil Physico-chemical Properties in Agricultural Soils”, Master's thesis in Korea, Suncheon University Graduate School. (2023).
 28. Choi, Y.-S., Kim, S.-C. and Shin, J.-D., “Adsorption Characteristics and Kinetic Models of Ammonium Nitrogen using Biochar from Rice Hull in Sandy Loam Soil”, Korean J. Soil Sci., 48(5), pp. 413~420. (2015).
 29. Li, X., Xu, S., Neupane, A., Abdoulmoumine, N., DeBruyn, J.-M., Walker, F.-R. and Jagadamma, S., “Co-application of biochar and nitrogen fertilizer reduced nitrogen losses from soil”, D. Hui, Ed., PLOSONE, Public Library of Science (PLoS), p. e0248100. (2021).
 30. Gai, X., Wang, H., Liu, J., Zhai, L., Liu, S., Ren, T. and Liu, H., “Effects of Feedstock and Pyrolysis Temperature on Biochar Adsorption of Ammonium and Nitrate”, J. A. Coles, Ed., PLoS ONE, Public Library of Science (PLoS), pp. 233~246. (2014).
 31. Zeng, Z., Zhang, S. D., Li, T. Q., Zhao, F. L., He, Z. L., Zhao, H. P., Yang, X. E., Wang, H. L., Zhao, J. and Rafiq, M. T., “Sorption of ammonium and phosphate from aqueous solution by biochar derived from phytoremediation plants”, Zhejiang Univ.-Sci. B, 14(12), pp. 1152~1161. (2013).