

Research Article

벼의 비소흡수와 축적에 미치는 볏짚퇴비의 효과

정하일¹, 김명숙¹, 전상호¹, 이태구¹, 채미진^{2*}

¹국립농업과학원 토양비료과, ²국립식량과학원 재배환경과

Effect of Rice Straw Compost on Arsenic Uptake and Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.)

Ha-il Jung¹, Myung-Sook Kim¹, Sangho Jeon¹, Tae-Gu Lee¹ and Mi-Jin Chae^{2*}

¹Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea,

²Crop Cultivation and Environment Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 16429, Republic of Korea

ABSTRACT

Arsenic (As) uptake and accumulation from agricultural soil to rice vary depending on the soil environmental conditions such as soil pH, redox potential, clay content, and organic matter (OM) content. Therefore, these factors are important in predicting changes in the uptake and accumulation of As in rice plants. Here, we studied the chemical properties of As-contaminated and/or rice straw compost (RSC)-treated soils, the growth responses of RSC-applied rice plants under As-contaminated soils, the changes in As content of soil, and the relationship between As uptake and accumulation from the RSC-treated soils to the rice organs under As-contaminated soils. Rice plants were cultivated in 30 mg kg⁻¹ As-contaminated soils under three RSC treatments: 0 (control), 12, and 24 Mg ha⁻¹. No significant differences were indicated in the chemical properties of pre-experimental (before transplanting rice seedling) soils, with the exception of EC, OM, and available P₂O₅. As the treatment of RSC under 30 mg kg⁻¹ As-contaminated soils increased, EC, OM, and available P₂O₅ increased proportionally in soil. Increased soil RSC under As-contaminated soils increased shoot dry weight of rice plants at harvesting stage. As content in roots increased proportionally with RSC content, whereas As content in shoots decreased under As-contaminated soil at all stages of rice plants. Nevertheless, As accumulation were significantly decreased in both roots and shoots of RSC-treated rice plants than those in the plants treated without RSC. These results indicate that the use of RSC can mitigate As phytotoxicity and reduce As accumulation in rice plants under As-contaminated soils. Therefore, RSC can potentially be applied to As-contaminated soil for safe crop and forage rice production.

(Key words: Arsenic, As accumulation, Growth response, Rice, Rice straw compost)

I. 서론

비소오염은 환경오염의 증가와 더불어 인간의 인위적 활동에 의하여 급속히 증가하고 있으며, 인간의 건강에 악영향을 끼치고 있다. 비소는 생체 내에서 중요한 기능을 담당하는 단백질 또는 효소생합성 등 대사과정을 교란시킴으로써, 식물을 비롯하여 가축에도 치명적인 독성을 야기하고 있다(Cappuyns et al., 2002; Antoniadis et al., 2019; Dradrach et al., 2020). 비소는 자연계에서 생물적 또는 비생물적 분해과정을 통하여 무독화 또는 안정화된 화합물로 변화되지 않고 생태계 내에 잔존하기 때문에 토양과

수질 등을 오염시킬 뿐만 아니라 인간의 먹거리 및 가축의 조사료를 오염시키고 있다(Roychowdhury et al., 2002; Zhu et al., 2008).

식물의 비소흡수이행과 식물독성 반응은 토양 중에 존재하는 비소함량에 비례적으로 증가하게 되며, 식물체 내 축적은 활성산소종을 발생시켜 세포막의 지질과산화유발함과 더불어 광합성, 활성산소종 소거 등 중요한 기능을 담당하는 필수 단백질들의 기능장애를 야기시킴으로써, 최종적으로 식물의 건전한 생육을 저해 또는 고사하게 한다.

비소 흡수량 및 축적량은 식물종 및 품종 간에도 많은 차이를

*Corresponding author: Mi-Jin Chae, Crop Cultivation and Environment Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 16429, Republic of Korea, Tel: +82-31-695-0643, Fax: +82-31-695-0635, E-mail: chmj011@korea.kr

나타낼뿐더러, 한 식물체 내에서도 뿌리, 줄기, 잎 등 조직부위별로도 상이한 양상을 나타낸다. 이 상이한 반응 차이는 식물종 및 품종의 대사, 생리 및 생태학적 차이에 기인한 것이며, 특히 대사 및 유전학적으로 운반수송체의 발현 차이가 비소흡수량과 축적량에 크게 관련되어 있다(Finnegan and Chen, 2012; Kumarathilaka et al., 2018; Kaya et al., 2020; Siddiqui et al., 2020; Verma et al., 2020). 또한 비소의 흡수량과 축적량은 토양의 화학적 특성인 토양 pH, 산화환원전위, 유기물함량 등에 따라 매우 큰 차이를 나타낸다(Meharg and Rahman, 2003; Bhattacharya et al., 2010; Ye et al., 2012; Jung et al., 2017). 특히 유기물 사용은 양분공급과 더불어 토양 이화학적 개선 효과를 기대할 수 있을 것이며, 비소-토양교질 간의 흡착능력의 증대로 식물체로의 비소 흡수량 및 축적량을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다(Norton et al., 2009; Ahmed et al., 2011; Chen et al., 2015).

따라서, 본 연구는 비소오염토양의 벧짚퇴비 사용에 따른 벼의 비소흡수에 미치는 영향을 평가하고, 소 등 가축에 이용하는 안전한 벧짚 생산 및 활용을 제고하기 위하여 연구를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 토양시료 및 시험식물

본 연구에 사용된 논토양은 국립농업과학원 내 시험포장에서 채취한 후 각기 처리구별 토양을 조제하여 시험에 이용하였다. 인위적인 고농도의 비소오염토양은 풍건세토 후 2 mm 체로 걸러진 식양토에 물로 용해시킨 메타아비산나트륨(NaAsO_2 ; Sigma-Aldrich, Inc.)을 첨가하여 제조하였으며, 이 고농도 비소오염토양은 3년 이상의 안정화과정을 거친 후 인위적 비소오염토양으로 사용되었다(Jung et al., 2021). 비소의 토양혼화처리는 $1,050 \text{ mg kg}^{-1}$ 농도의 인위적 비소오염토양을 식양토에 희석하여 비소처리구 (30 mg kg^{-1})를 조제하였고, 비소-벧짚퇴비처리구는 국립농업과

학원에서 자가 제조한 완숙벧짚퇴비를 사용하여 표준양(12 Mg ha^{-1})과 2배양(24 Mg ha^{-1})을 토양에 혼화처리하여 조제하였다(Table 1). 국립농업과학원 작물별 시비처방기준(NAS, 2019)에 의거하여 질소, 인산, 그리고 칼리질비료는 110, 45, 그리고 57 kg ha^{-1} 으로 전층에 토양혼화처리하였다. 온실조건 하에서 시험식물인 다산벼 (*Oryza sativa* L.) 종자를 수도용 상토로 증진된 규격육묘상 ($60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ tray)에 파종하고, 균일한 32일된 묘묘를 선별하여 각 처리구별 Wagner 포트(0.02 m^2 표면적, 3 kg 처리토양 증진)에 1주씩을 이식하고, 주야간 $30/25^\circ\text{C}$ 평균온도를 유지하였다. 또한 3-4 cm 상시답수심을 유지하기 위하여, 모든 처리포트에 부족시 마다 동일한 양의 수돗물을 공급하면서 이앙기(2017년 5월 31일)부터 수확기(2017년 10월 11일)까지 실험을 수행하였다.

2. 토양화학성 및 토양 내 비소 전함량 분석

벼 이앙 전에 토양화학성과 시험전(이앙기) 및 시험후(수확기) 토양의 비소 전함량 분석을 위하여, 각기 처리별 약 200 g 토양 시료를 풍건하여 잘게 부수어 2 mm 표준체로 거른 시료를 분석에 사용하였다.

토양화학성은 분석항목별로 농촌진흥청 농업과학기술에서 제시한 표준분석방법에 의거하여 실시하였다(RDA, 2012). 토양 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 진탕한 후, 각기 측정 값을 분석하였고, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였다. 교환성 양이온(칼륨, 칼슘, 마그네슘, 나트륨)은 1 M 아세트산암모늄(NH_4OAc , pH7.0)로 침출하여, 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES, GBC, Australia)로 분석하였다.

토양 비소 전함량 분석을 위하여, 2 mm 표준체에 걸러진 토양 시료를 다시 토양파쇄기(300 rpm , 10분)를 이용하여 곱게 마쇄한 후, 비소 전함량 분석에 사용하였다. 토양 비소 전함량 분석은 3 g 시료를 왕수(conc. $\text{HCl} + \text{HNO}_3$)로 150°C 에서 2시간 분해한 다음, 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES, AU/CINTRA 6, GBC Scientific, Australia)로 측정하였다(Jung et al., 2017).

Table 1. Chemical properties of the soil analyzed before the experiment

Treatment [†]	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	OM (g kg^{-1})	Avail. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Exch. cations (cmol kg^{-1})			
					K	Ca	Mg	Na
Control	7.36 a	0.34 c	7.70 c	60.9 b	0.18 a	9.65 a	3.24 a	0.19 a
30 As + 0 RSC	7.34 a	0.37 bc	7.82 c	64.6 b	0.17 a	10.11 a	3.33 a	0.21 a
30 As + 12 RSC	7.37 a	0.39 b	8.62 b	70.4 a	0.19 a	9.96 a	3.29 a	0.21 a
30 As + 24 RSC	7.40 a	0.45 a	10.11 a	68.5 a	0.20 a	9.60 a	3.18 a	0.21 a

[†]As, Arsenic (mg kg^{-1}); RSC, Rice straw compost (Mg ha^{-1}).

[‡]The data are presented as mean \pm standard deviation of the mean of three replications. Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the $P < 0.05$ level based on Duncan's multiple range test (DMRT).

3. 벼 생장반응 분석

비소 독성에 대한 생장반응을 분석하기 위하여, 분얼기(7월 17일), 출수기(8월 23일), 그리고 수확기(10월 11일)에 초장, 분얼수, 지상부 및 지하부(뿌리) 건물중을 조사하였다.

4. 벼 생육단계별 식물체 내 비소함량 및 축적량 분석

벼 생육단계별(분얼기, 출수기 및 수확기)로 채취한 식물체 시료는 뿌리와 지상부로 나누고, 각기 시료에 부착된 먼지 또는 토양입자를 수돗물로 제거한 후, 다시 증류수로 수회 헹궈주었다. 각기 세척된 시료는 80°C에서 2일간 건조시킨 후 곱게 분쇄하여 분석에 이용하였다. 식물체의 비소함량 분석을 위하여, 시료분해는 Graphite Block Acid Digestion System (ODLAB Co., Ltd. Seoul, Korea)을 이용하였고, 건조된 분말시료 200 mg에 14 mL 질산을 첨가하고 산분해한 분해액을 여과지(No. 40, Whatman, Buckinghamshire, UK)에서 불순물을 제거한 후, 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Agilent 7900, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA)에서 비소함량을 측정하였다. 벼 생육 단계별 지상부 또는 지하부(뿌리)의 비소축적량은 각기 부위별 비소농도에 한 식물체의 건물중을 곱하여 산출하였다.

5. 데이터 분석과 통계처리

본 연구는 완전임의배치 3반복으로 국립농업과학원 내 온실에서 수행되었고, 실험을 통하여 얻은 결과는 평균값과 표준편차를 도출하여 표와 그래프를 작성하였다. 모든 데이터의 통계처리는 Statistical Analysis Software (SAS ver. 9.2) 프로그램을 사용하여 처리 간 분산분석 (ANOVA)을 실시하였고, 처리의 효과는 Duncan 다중검정($p = 0.05$)을 통하여 유의성 유무를 판단하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 비소오염토양의 벼짚퇴비 수준별 토양화학성

비소오염토양(30 mg kg^{-1})에 각각 0, 12, 24 Mg ha^{-1} 의 벼짚퇴비를 처리한 토양의 화학적 특성 중 pH, 교환성 K, Ca, Mg, Na 함량은 벼짚퇴비 처리수준이 증가하더라도 비슷한 수준을 나타냈지만, 토양 중 EC, 유기물 함량, 유효인산은 벼짚퇴비 수준이 증가함에 따라 유의적으로 증가하는 경향을 나타냈다(Table 1). 이와 같은 결과는 벼짚퇴비 처리수준의 증가로 인한 유기물 공급 효과를 기대할 수 있을 것이며, 이에 따라 유기물 함량과 유효인산이 증대되었을 것으로 판단된다. 그렇지만 유기물에 다량 포함된 영양염류의 영향으로 EC가 증가하는 경향을 보였지만, 이는

벼 생육에 적절한 EC범위를 나타냈다(Table 1).

2. 벼짚퇴비 수준별 토양 중 비소함량 및 생육변화

비소는 토양으로부터 식물체 내로 흡수이행되면 비소독성에 의한 세포막 손상을 유발할 뿐만 아니라 염록소함량을 감소시키고, 광합성에 부정적인 영향을 끼침으로써 전반적인 식물생육을 저해하게 된다(Kumarathilaka et al., 2018; Kaya et al., 2020; Verma et al., 2020).

비소오염토양의 벼짚퇴비 수준별 시험전후 토양 중 비소 잔존량 변화는 고수준으로 처리된 24 Mg ha^{-1} 에서 6% 감소를 나타냈지만, 저수준으로 처리된 12 Mg ha^{-1} 에서는 유의적인 차이가 없었다(Fig. 1).

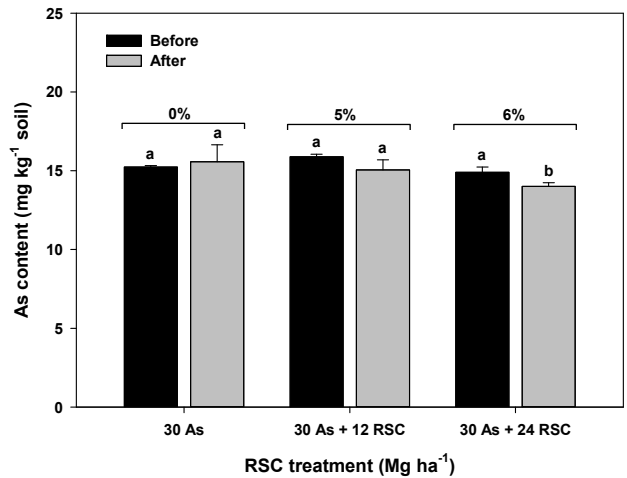


Fig. 1. Changes in As content of the soil before transplanting rice seedlings (before) and after harvesting rice plants at the harvesting stage (after) and reduction rates (numbers at the top of the columns) of As content under treatments of rice straw compost. The data are presented as mean \pm standard deviation of the mean of three replications. Means denoted by the same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level based on Duncan's multiple range test (DMRT). As, Arsenic (mg kg^{-1}); RSC, Rice straw compost (Mg ha^{-1}).

비소오염토양 내에 벼짚퇴비 수준이 증가할수록 분얼기, 출수기에 벼의 분얼수, 지상부 및 뿌리 건물중은 모두 감소하였지만, 초장은 처리 간에 유의적인 차이가 없었다. 그렇지만 수확기의 지상부 건물중은 벼짚퇴비 24 Mg ha^{-1} 에서 증대됨을 확인할 수 있었다(Table 2).

Table 2. Effects of the application of rice straw compost on plant height, tiller number, shoot dry weight, and root dry weight of rice plants at the tillering, heading, and harvesting stages under As-stressed conditions

Treatment [†]	Plant height (cm)	Number of tillers	Shoot dry weight (g)	Root dry weight (g)
Tillering stage				
Control	74 a	19 a	15.1 a	3.6 a
30 As + 0 RSC	69 a	17 ab	14.0 a	3.9 a
30 As + 12 RSC	71 a	15 b	11.4 b	3.1 b
30 As + 24 RSC	68 a	17 ab	9.2 b	2.9 b
Heading stage				
Control	93 a	16 a	80.0 a	4.4 a
30 As + 0 RSC	93 a	15 a	63.1 b	4.3 a
30 As + 12 RSC	90 a	11 b	50.5 c	3.6 b
30 As + 24 RSC	89 a	12 b	42.9 d	3.7 b
Harvesting stage				
Control	102 a	14 a	52.3 b	3.6 a
30 As + 0 RSC	100 a	15 a	49.8 b	4.0 a
30 As + 12 RSC	96 a	10 b	42.4 c	3.7 a
30 As + 24 RSC	99 a	12 b	58.6 a	3.4 b

[†]As, Arsenic (mg kg⁻¹); RSC, Rice straw compost (Mg ha⁻¹).

[‡]The data are presented as mean ± standard deviation of the mean of three replications. Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the $p < 0.05$ level based on Duncan's multiple range test (DMRT).

3. 벧짚퇴비 수준별 식물체 내 비소함량 및 축적량

토양으로부터 식물체 내로 비소의 흡수량, 이행도 및 축적량은 토양 pH, 점토함량, 유기물함량, 산화환원조건 등 토양의 화학적 특성에 따라 매우 상이한 반응을 나타낸다(Meharg and Rahman, 2003; Bhattacharya et al., 2010; Ye et al., 2012; Jung et al., 2017). 또한 비소의 식물체 내 축적은 필수 단백질들의 기능장애를 초래하고 활성산소종을 유발시켜 세포의 지질과산화물을 유발함으로써 결국에는 식물체를 고사하게 한다(Finnegan and Chen, 2012; Siddiqui et al., 2020).

벼 생육단계별 비소오염토양의 유기물 사용량에 따른 식물체 내 비소함량은 지하부(뿌리)와 지상부 간에 상반되는 양상을 보였다. 지하부(뿌리)의 비소함량은 유기물 사용량의 증가에 따라 전 생육단계(분얼기, 출수기 및 수확기) 모두에서 직선적으로 비소함량이 증가했던 반면, 지상부의 비소함량은 오히려 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 2). 그렇지만 생물체량에 기반을 둔 비소의 축적량은 벧짚퇴비 수준의 증가에 따라 벼 생육단계 모두에서 지하부(뿌리)뿐만 아니라 지상부에서도 유기물 사용량에 비례하여 유의적인 감소를 나타냈다(Fig. 3).

비소의 식물체 내로의 흡수 및 축적량은 식물종 간에도 많은 차이를 나타낼 뿐만 아니라 뿌리, 줄기, 잎 등 조직 특이적으로도

상이한 양상을 나타낸다. 이는 식물체의 생리생태형태학적 차이를 비롯하여 생육단계별 비소 운반수송체의 발현양상의 차이에 기인하고 있음을 보여주는 것이며, 또한 다양한 재료로부터 제조된 유기물 사용에 따라 비소의 흡수양상에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Norton et al., 2009; Ahmed et al., 2011; Chen et al., 2015; Jung et al., 2021). 특히 중금속 오염토양에 유기물의 사용은 여러 양분공급 및 토양 이화학성 개선 효과를 비롯하여 토양 교질 내의 다양한 음전하를 증가시킴으로써, 중금속토양 간의 흡착능력이 증대되어 식물체로의 중금속 흡수 및 축적량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 생각된다(Han et al., 1997). 그러므로 이상의 결과는 비소오염토양에 벧짚퇴비 사용으로 토양교질 내의 음전하량을 증가시켜 비소의 흡착능력을 증대시킴으로써, 토양으로부터 벼 식물체의 지상부로 비소흡수 및 축적량을 감소시키는 것으로 판단된다.

IV. 요약

본 연구는 비소오염토양에 벧짚퇴비 사용량 증대가 토양의 화학성, 벼의 생육 특성 그리고 식물체의 비소함량에 미치는 영향을 평가하였다. 비소오염토양 중 벧짚퇴비 사용량이 증가하면서 벼

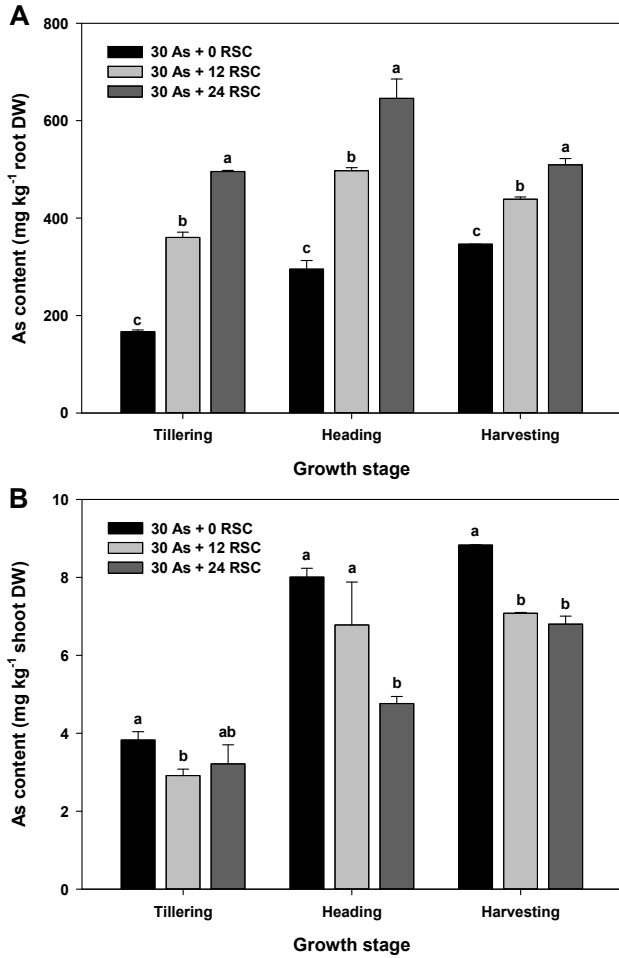


Fig. 2. Effects of the application of rice straw compost on As content in the roots (A) and shoots (B) of rice plants at the tillering, heading, and harvesting stages under As-stressed conditions. The data are presented as mean \pm standard deviation of the mean of three replications. Means denoted by the same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level based on Duncan's multiple range test (DMRT). As, Arsenic (mg kg^{-1}); RSC, Rice straw compost (Mg ha^{-1}).

생육단계(분얼기, 출수기 및 수확기) 모두에서 지상부 비소함량 및 축적량은 감소되었다. 결과적으로 비소오염토양에 벼짚퇴비의 사용에 따른 토양교질 내의 다양한 음전하가 증가되고, 이로 인하여 비소의 흡착능력이 향상됨으로써 토양에서 벼 식물체로의 흡수 및 축적량을 감소시키는 것으로 판단된다. 따라서 비소오염토양에 벼짚퇴비의 사용은 벼 지상부로의 비소흡수축적을 감소시키는 하나의 요인이 될 수 있으며, 안전한 농산물 및 가축의 조사료 생산을 위한 벼 재배관리에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

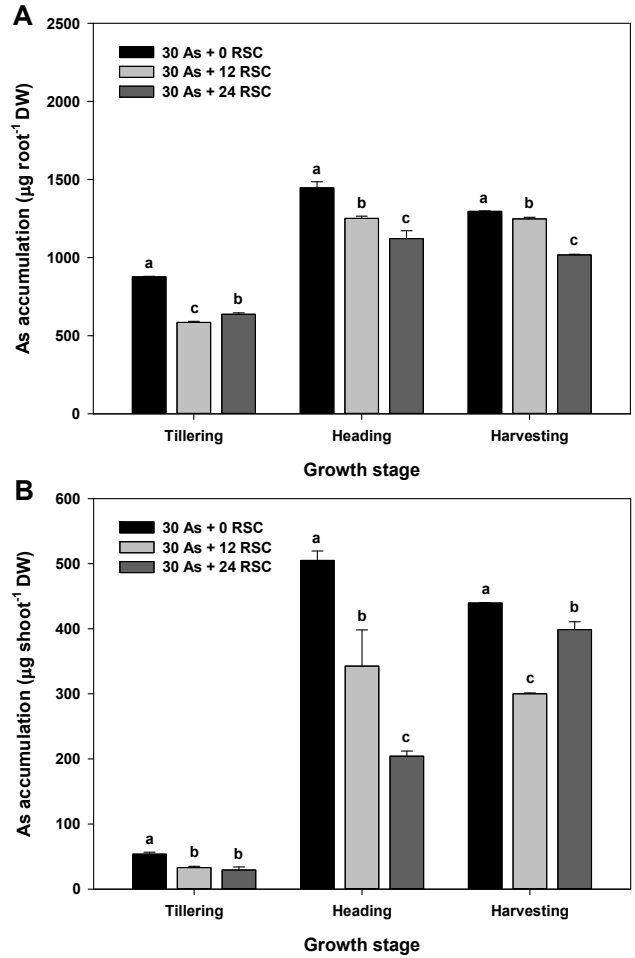


Fig. 3. Effects of the application of rice straw compost on As accumulation in the roots (A) and shoots (B) of rice plants at the tillering, heading, and harvesting stages under As-stressed conditions. The data are presented as mean \pm standard deviation of the mean of three replications. Means denoted by the same letter are not significantly different at the $p < 0.05$ level based on Duncan's multiple range test (DMRT). As, Arsenic (mg kg^{-1}); RSC, Rice straw compost (Mg ha^{-1}).

V. 시사

This work was supported by the "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ014360)," Rural Development Administration, Republic of Korea.

VI. REFERENCES

- Ahmed, Z.U., Panaullah, G.M., Gauch, H., McCouch, S.R., Tyagi, W., Kabir, M.S. and Duxbury, J.M. 2011. Genotype and environment effects on rice (*Oryza sativa* L.) grain arsenic concentration in Bangladesh. *Plant and Soil*. 338(1-2):367-382.
- Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Levozou, E., Shahid, M., Niazi, N.K., Vithanage, M., Ok, Y.S., Bolan, N. and Rinklebe, J. 2019. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment?-A review. *Environment International*. 127:819-847.
- Bhattacharya, P., Samal, A.C., Majumdar, J. and Santra, S.C. 2010. Accumulation of arsenic and its distribution in rice plant (*Oryza sativa* L.) in Gangetic West Bengal, India. *Paddy and Water Environment*. 8(1):63-70.
- Cappuyns, V., Herreweghe, S.V., Swennen, R., Ottenburgs, R. and Deckers, J. 2002. Arsenic pollution at the industrial site of Reppel-Bocholt (north Belgium). *Science of the Total Environment*. 295:217-240.
- Chen, Y., Moore, K.L., Miller, A.J., McGrath, S.P., Ma, J.F. and Zhao, F.J. 2015. The role of nodes in arsenic storage and distribution in rice. *Journal of Experimental Botany*. 66(13):3717-3724.
- Dradrach, A., Karczewska, A. and Szopka, K. 2020. Arsenic accumulation by red fescue (*Festuca rubra*) growing in mine affected soils-Findings from the field and greenhouse studies. *Chemosphere*. 248:126045.
- Finnegan, P.M. and Chen, W. 2012. Arsenic toxicity: The effects on plant metabolism. *Frontiers in Physiology*. 3:182.
- Han, K.W., Cho, J.Y. and You, Y.S. 1997. Several factors on growth of radish and absorption and translocation of chromium. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 30(4):370-376.
- Jung, H.I., Chae, M.J., Lee, T.J., Yoon, J.H., Kim, M.S., Jeon, S. and Kim, H.S. 2021. Soil Nutrient and Rice (*Oryza sativa* L.) Growth Characteristics under Different Arsenic Contamination Levels. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 54(4):601-609.
- Jung, H.I., Lee, J., Chae, M.J., Kong, M.S., Lee, C.H., Kang, S.S. and Kim, Y.H. 2017. Growth-inhibition patterns and transfer-factor profiles in arsenic-stressed rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Monitoring and Assessment*. 189:638.
- Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M.N., Corpas, F.J. and Ahmad, P. 2020. Salicylic acid-induced nitric oxide enhances arsenic toxicity tolerance in maize plants by upregulating the ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase system. *Journal of Hazardous Materials*. 399:123020.
- Kumarathilaka, P., Seneweera, S., Meharg, A. and Bundschuh, J. 2018. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) is influenced by environment and genetic factors. *Science of the Total Environment*. 642:485-496.
- Meharg, A.A. and Rahman, M.M. 2003. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: implications for rice contribution to arsenic consumption. *Environmental Science and Technology*. 37(2):229-234.
- NAS. 2019. Fertilizer recommendation for crop production (4th ed.). National Institute of Agricultural Science. RDA. Wanju. Korea.
- Norton, G.J., Duan, G., Dasgupta, T., Islam, M.R., Lei, M., Zhu, Y., Deacon, C.M., Moran, A.C., Islam, S., Zhao, F.J., Stroud, J.L., McGrath, S.P., Feldmann, J., Price, A.H. and Meharg, A.A. 2009. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: Comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India. *Environmental Science and Technology*. 43(21):8381-8386.
- RDA. 2012. Analysis standard for research in agricultural science and technology. RDA. Suwon. Korea.
- Roychowdhury, T., Uchino, T., Tokunaga, H. and Ando, M. 2002. Survey of arsenic in food composites from an arsenic-affected area of West Bengal, India. *Food and Chemical Toxicology*. 40(11):1611-1621.
- Siddiqui, M.H., Alamri, S., Khan, M.N., Corpas, F.J., Al-Amri, A.A., Alsubaie, Q.D., Ali, H.M., Kalaji, H.M. and Ahmad, P. 2020. Melatonin and calcium function synergistically to promote the resilience through ROS metabolism under arsenic-induced stress. *Journal of Hazardous Materials*. 398:122882.
- Verma, G., Srivastava, D., Narayan, S., Shirke, P.A. and Chakrabarty, D. 2020. Exogenous application of methyl jasmonate alleviates arsenic toxicity by modulating its uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology Environmental Safety*. 201:110735.
- Ye, X.X., Sun, B. and Yin, Y.L. 2012. Variation of As concentration between soil types and rice genotypes and the selection of cultivars for reducing As in the diet. *Chemosphere*. 87(4):384-389.
- Zhu, Y.G., Williams, P.N. and Meharg, A.A. 2008. Exposure to inorganic arsenic from rice: A global health issue? *Environmental Pollution*. 154(2):169-171.

(Received : June 15, 2022 | Revised : June 20, 2022 | Accepted : June 20, 2022)