

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.3.289>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Assessment of Heavy Metal Concentrations in the Upland Soils of Gyeongnam Province

Hyeon-Ji Cho, Daniel Son, Si-Lim Choi, Young Han Lee, Jeongyeo Lee^{1**}, and Jae-Young Heo*

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Republic of Korea

¹Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, 125 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

*Corresponding author: bopo@korea.kr

**Co-corresponding author: leejy@kribb.re.kr

ABSTRACT

Received: July 19, 2018

Revised: August 27, 2018

Accepted: August 31, 2018

The management of heavy metals concentration in upland soil is important for a better understanding of the negative effects on the agroecosystem as well as on humans. The accumulation of heavy metals in upland soils is related to various factors, such as parent materials, topography, and soil physicochemical properties. In this study, we investigated the concentrations of 9 heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, Cr⁶⁺, and Hg) and their relationships to environmental features of 176 upland soil samples collected from Gyeongnam Province, South Korea. Our results showed that soil pH was positively associated with the concentrations of Cd, Cu, and Zn in upland soils. Soil organic matter was also positively correlated with the concentrations of Cu, Pb, Zn, Cr⁶⁺, and Hg in upland soils. Depending on the type of crop, the concentrations of Cd, Cu, and As were highest in the soil of Chinese cabbage, while the concentrations of Pb and Zn were highest in the soil of Welsh onion. The clay contents in upland soils had a significant positive effect on the concentrations of Cu, Ni, As, and Cr. Also, the concentrations of Cd, Cu, and Zn were significantly high in fluvio-marine plain, whereas those of Ni, As, and Cr were significantly high in diluvial terrace. These results showed that heavy metal concentrations in upland soils are regulated by soil physicochemical properties such as soil organic matter and clay content.

Keywords: Heavy metal, Upland soil, Soil texture, Soil topography

Correlation coefficient between heavy metals and soil organic matter of upland soils in Gyeongnam Province ($n=176$).

	OM	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cr ⁶⁺	Hg
pH	0.142	0.176* [†]	0.308***	0.010	0.084	0.180*	0.085	0.032	-0.010	-0.002
OM		0.100	0.353***	0.037	0.166*	0.352***	0.130	0.138	0.299***	0.175*
Cd			0.404***	0.062	0.332***	0.408***	0.433***	0.056	-0.017	0.012
Cu				0.236**	0.458***	0.713***	0.310***	0.181*	0.069	0.119
Ni					0.035	0.112	0.313***	0.682***	-0.052	0.000
Pb						0.615***	0.276***	0.063	-0.079	0.170
Zn							0.248***	0.109	0.066	0.125
As								0.174*	0.075	0.052
Cr									-0.043	-0.006
Cr ⁶⁺										0.044

[†] * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.



Introduction

우리나라는 벼농사를 주축으로 해 왔기 때문에 비옥하고 관배수가 용이한 평탄지는 대부분 논으로 이용되거나 근래에 와서는 시설원예지로 이용되어 밭은 주로 경사지에 형성되었다. 따라서 침식이 많이 일어나 양분용탈이 심하여 비옥도가 낮아지기 쉬우며, 산성화가 많이 진전되어 활성화 된 금속이온에 의한 인산의 불용화와 중금속의 용출 및 식물로의 흡수율이 높아질 수 있다 (Rees et al., 2014; Willscher et al., 2017). 농작물의 근권토양에서 뿌리로 흡수된 중금속은 식물전체로 전이되고, 특히 수확되는 가식부에 축적이 되어 이를 섭취함으로써 인간의 건강을 악화시킬 수 있는 위험요소가 되고 있다 (Zhuang et al., 2009). 특히 중금속은 적은 농도라도 심각한 독성을 유발할 수 있다 (Bhargava et al., 2012; Giromini et al., 2016). 토양에서 중금속 축적은 화석연료 연소, 광업, 제련, 차량, 오염된 농업용수 관개, 슬러지 시용과 비료의 과다사용 등으로 발생된다 (Temmerman et al., 2003; Lu et al., 2012; Zhang et al., 2018). 그리고 제초제와 살균 및 살충제 등 유기합성농약의 과다사용도 농경지에 Cu, As 및 Pb 등의 중금속의 축적을 유발한다 (McLaughlin et al., 2000; Jiang et al., 2018). Park et al. (1999)의 보고에 따르면 고추생육과 토양 중 Zn, Cu, Pb, Cd, As 함량과 유의한 부의 상관관계를 보였고, 토양 중 Zn, Cu, Cd, As 함량과 고추열매의 Zn, Cd, As 함량과는 고도의 유의성이 나타나 토양 중 중금속 증가가 식물체에 흡수 및 축적의 증가로 이어진다고 판단하였다. Lee et al. (2012)은 경남 지역 논토양 260개소를 2011년에 토성 및 지형별 중금속 함량의 차이를 조사하여 Cd의 함량은 산록경사지에서, Ni, As는 홍적대지, Zn의 함량은 해안평탄지에서 가장 높게 나타났다고 보고한바 있다. Son et al. (2017)은 경남지역 시설재배지 표토 토양에서 고추의 경우 Cu, Pb, As의 함량이 다른 작물에 비해 높았고, 멜론은 Cd, Cr, Ni의 함량이 높았고, Cr과 Ni의 함량은 홍적대지 심토에서 가장 높았으며, Cd, Cr, Ni의 함량은 미사질식양토와 미사질양토에서 사양토, 양토보다 높았다고 보고하였다. Go et al. (2012)은 돈분액비의 장기 연용이 밭토양의 중금속 증가와 고도의 연관이 있다고 보고하였다. 밭토양의 유기물사용은 환경적인 이유로 비옥도가 상대적으로 낮고 퇴비의 의존도가 높아 밭토양의 중금속의 지속적인 조사가 요구된다.

본 연구는 경남지역 밭토양 176개소를 대상으로 2017년에 토양 중금속 전함량분석으로 재배작물과 지형, 토성, 경작지 경사도, 배수등급, 모재별 토양 중금속 함량의 차이를 비교하여 토양관리를 위한 기초 자료로 제공하고자 수행하였다.

Materials and Methods

밭토양 선정 및 시료채취 경남지역 밭토양 중금속 전함량을 분석하기 위하여 2017년에 토양 유형, 지형 및 토성과 분포면적 비율을 기준으로 176개 지점을 선정하였다 (RDA, 1983). 토양은 비료를 사용하지 전인 3월부터 4월 사이에 표토 0-15 cm 깊이에서 500 g 정도를 3반복으로 채취하였다.

토양시료조제 및 중금속 분석 채취한 토양시료는 실험실에서 7일간 풍건한 후 쇄토하여 2 mm 체를 통과된 것을 미세하게 분쇄하여 중금속 분석에 사용하였다. 중금속 분석은 토양오염공정시험기준 (ME, 2015)을 적용하여 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr은 전함량으로 ICP-OES (Inductively coupled plasma optical emission spectrophotometer, Optima 5300 DV, PerkinElmer co., Shelton, USA)로 분석하였다. 그리고 Cr⁶⁺는 디페닐카르바지드 (diphenylcarbazine, C₁₃H₁₄N₄O, 242.28)용액 0.5%에 반응시켜 UV-1800 (Shimadzu, Japan)을 이용하여 540 nm로 흡광도를 측정하여 분석하였다. Hg는 토양 시료 0.2 g을 취하여 Hg analyzer (DMA-80, Milestone)를 이용해 분석하였다.

토양조사지점 지형 및 표토의 토성 조사 경남지역 토양조사지점의 지형, 표토의 토성 특성은 농촌진흥청 토양 환경정보시스템인 흙토람 (SIS, <http://soil.rda.go.kr/>)에 해당 지점의 지번 등을 입력하여 출력된 자료를 이용하였다.

통계분석 및 상관계수 분석 176개소의 밭토양 중금속 함량을 통계분석 및 상관계수 분석하기 위해 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하였다. 재배작물과 지형, 토성, 경작지 경사, 배수등급, 모재별 토양 중금속 함량은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였다. 또한, 토양 중금속 함량과 유기물 및 pH와의 상관계수 분석을 하였다.

Results and Discussion

재배작물별 밭토양 중금속 함량 경남지역 재배작물별 밭토양의 중금속 함량은 Table 1과 같다. 재배작물에 따라 토양 중 Cd 평균 함량은 배추가 0.56 mg kg⁻¹으로 가장 높았다 ($P < 0.05$). Cu 함량도 배추에서 24.58 mg kg⁻¹으로 가장 높았고, 고구마에서 5.15 mg kg⁻¹로 가장 낮은 경향을 보였다 ($P < 0.05$). 대체적으로 배추와 기타작물 등 유기물 함량이 많은 토양에서 Cu와 Zn 함량이 높았는데 이러한 결과는 Jakubus et al. (2013)의 결과와 같이 가축분퇴비의 사용과 관련이 있는 것으로 판단되었다. Ni 평균 함량은 21.33 mg kg⁻¹, 20.08 mg kg⁻¹으로 기타작물과 옥수수에서 가장 높은 경향을 보였고, 가장 낮은 평균 수치는 고구마에서 9.44 mg kg⁻¹이었다 ($P < 0.05$). Pb의 경우 파에서 30.41 mg kg⁻¹으로 가장 높게 나타났으며, 상추에서 4.56 mg kg⁻¹으로 가장 낮은 경향을 나타냈다 ($P < 0.05$). Zn 함량은 Pb와 유사하게 파에서 156.19 mg kg⁻¹로 가장 높았고, 상추에서 71.25 mg kg⁻¹로 가장 낮았다 ($P < 0.05$). As의 경우 배추와 기타작물에서 8.01 mg kg⁻¹, 8.20 mg kg⁻¹으로 다른 작물들 보다 높게 나타났다 ($P < 0.05$). 밭토양의 Cr 함량의 경

Table 1. Heavy metal concentrations in upland soils by crop in Gyeongnam Province.

Crop (sample)	pH	OM	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cr ⁶⁺	Hg
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹								
Potato (11)	6.1ab [†]	31a	0.11c	19.44ab	12.74ab	14.58abc	98.73bcd	1.82b	32.49ab	0.011a	0.034a
Sweet potato (4)	5.7b	19a	0.09c	5.15c	9.44b	18.73abc	76.97cd	1.25b	18.08b	0.007ab	0.041a
Red pepper (20)	6.7a	32a	0.11c	18.70abc	18.58ab	11.21bc	97.78bcd	2.20b	28.66b	0.010a	0.062a
Chinese cabbage (5)	6.6ab	31a	0.56a	24.58a	13.57ab	18.94abc	121.35ab	8.01a	36.75ab	0.008ab	0.051a
Lettuce (5)	6.5ab	23a	0.08c	9.18bc	12.27ab	4.56c	71.25d	1.59b	21.75b	0.004b	0.026a
Spinach (11)	6.9a	25a	0.11c	18.69abc	16.13ab	12.50bc	92.76bcd	4.10ab	29.90ab	0.006ab	0.063a
Corn (4)	6.2ab	23a	0.13c	21.25ab	20.08a	24.70ab	114.93bc	4.55ab	27.80b	0.006ab	0.047a
Soybean (25)	6.5ab	27a	0.14c	17.04abc	17.85ab	15.43abc	98.67bcd	3.33ab	29.95ab	0.008ab	0.046a
Perilla (20)	6.5ab	27a	0.16c	14.06abc	14.52ab	15.77abc	96.08bcd	4.05ab	26.64b	0.008ab	0.046a
Garlic (54)	6.7a	30a	0.13c	21.29ab	16.32ab	15.44abc	100.71bcd	2.58b	33.08ab	0.007ab	0.055a
Onion (7)	6.3ab	24a	0.13c	20.43ab	13.88ab	24.21abc	89.83bcd	3.01b	31.45ab	0.010a	0.034a
Welsh onion (7)	6.4ab	23a	0.16c	20.39ab	18.52ab	30.41a	156.19a	1.67b	36.59ab	0.008ab	0.030a
Others (6)	6.8a	33a	0.39b	23.59ab	21.33a	26.04ab	114.10bc	8.20a	48.79a	0.007ab	0.041a
Mean	6.6	28	0.15	18.70	16.21	15.88	99.80	3.19	31.04	0.008	0.049
Threshold limit	-	-	4	150	100	200	300	25	-	5	4

[†]Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

우 기타작물에서 48.79 mg kg^{-1} 으로 다른 작물들에서보다 높은 경향을 나타냈다 ($P < 0.05$). 그리고 Cr^{6+} 의 경우 감자와 고추, 양파에서 0.011 mg kg^{-1} , 0.01 mg kg^{-1} , 0.01 mg kg^{-1} 으로 다른 작물들에서보다 높은 경향을 나타냈다 ($P < 0.05$). Hg 함량은 작물에 따른 차이를 보이지 않았다. Wen et al. (2018)은 작물마다 차이는 있지만 대체로 작물의 근권부위의 토양이 비근권 토양보다 중금속 함량이 높다고 하였다. 따라서 향후 작물별 근권부위의 토양에 대한 모니터링도 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 경남지역 밭토양의 중금속 평균 함량은 Hg 0.049, Cr^{6+} 0.008, Cd 0.15, Pb 15.88, Cu 18.70, As 3.19, Ni 16.21, Zn 99.80 mg kg^{-1} 으로 토양오염우려기준에 비해 Hg 0.1%, Cr^{6+} 0.2%, Cd 3.8%, Pb 7.9%, Cu 12.5%, As 12.8%, Ni 16.2%, Zn 33.3% 수준이었다.

지형 및 토성별 밭토양 중금속 함량 경남지역 밭토양의 지형별 중금속 함량은 Table 2와 같다. 시료채취 지점을 살펴보면 밭작물 재배지의 지형은 곡간지, 산록경사지, 구릉지 등에 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. Cd, Cu, Pb, Zn의 경우 하해혼성평탄지에서 0.64 mg kg^{-1} , 37.95 mg kg^{-1} , 27.37 mg kg^{-1} , $149.74 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났고, Ni, As, Cr의 경우 홍적대지에서 27.07 mg kg^{-1} , 7.08 mg kg^{-1} , 43.91 mg kg^{-1} 로 가장 낮은 경향을 보였다. Ahn et al. (2010)은 전북지역 밭토양에서 Cr, Pb, Ni 및 Hg은 지형에 따른 차이가 없었으나 Cd은 산록경사지, Cu는 산록경사지, 하성평탄지 및 홍적대지, Zn은 산록경사지와 하성평탄지, As는 하성평탄지에서 가장 높게 나타나 대체로 산록경사지가 다른 지형에 비해 중금속 함량이 높다고 보고한 결과와 차이가 있었다. 밭토양의 Cr^{6+} 와 Hg 함량은 지형에 따른 토양 중금속 함량의 차이는 없는 것으로 나타났다. Wang et al. (2016)은 석탄광산에서 식생복원에 영향을 미치는 것은 지형적인 조건보다 토양의 양분관리가 중요하다고 보고한 바와 같이 본 연구에서도 지형적인 조건보다 작물에 따른 유기물, 비료, 농약 시용의 차이에 따른 영향이 큰 것으로 판단된다.

Table 2. Heavy metal concentrations in upland soils by soil topography in Gyeongnam Province.

Topography (sample)	pH	OM	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cr^{6+}	Hg	
	(1:5)	g kg^{-1}	-----					mg kg^{-1}	-----			
Valley (64)	6.6b [†]	26ab	0.13b	16.51b	16.5bc	14.74ab	95.29b	2.31ab	31.22ab	0.007a	0.043a	
Hilly (21)	6.3b	21b	0.12b	15.78b	19.86ab	16.36ab	83.41b	3.37ab	35.22ab	0.006a	0.083a	
Mountain footslope (36)	6.8b	38a	0.21b	24.8b	17.73bc	20.29ab	117.32ab	4.93ab	36.61ab	0.009a	0.053a	
Mountainous (5)	6.8b	30ab	0.11b	12.39b	10.82c	9.29b	82.85b	6.43ab	21.96b	0.006a	0.029a	
Alluvial fan (16)	6.6b	32ab	0.19b	24.63b	15.43bc	21.44ab	113.08b	3.7ab	29.05ab	0.008a	0.064a	
Alluvial plain (28)	6.3b	23b	0.09b	13.55b	11.37bc	8.78b	89.13b	1.66b	21.62b	0.009a	0.031a	
Fluvio-marine plain (3)	7.7a	27ab	0.64a	37.95a	13.85bc	27.37a	149.74a	2.05b	31.73ab	0.006a	0.029a	
Diluvial terrace (3)	7.0ab	30ab	0.15b	20.25b	27.07a	20.21ab	105.16b	7.08a	43.91a	0.007a	0.051a	
Threshold limit			4	150	100	200	300	25	-	5	4	

[†]Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

밭토양의 표토의 토성별 중금속 함량은 Table 3과 같다. 미사질식양토에서 Cu, Ni, As, Cr의 함량은 23.83 mg kg^{-1} , 27.71 mg kg^{-1} , 5.63 mg kg^{-1} , 43.68 mg kg^{-1} 로 사양토, 양토, 미사질양토에 비해 유의적으로 높게 나타났다 ($P < 0.05$). 이러한 결과는 Mbarki et al. (2018)이 식물체의 Zn, Cu, Pb 및 Cd 흡수력은 점질토양보다 사질토양에서 높다고 보고

한 바와 같이 식물체의 중금속 흡수력의 차이로 인하여 미사질식양토가 사양토에 비해 상대적으로 토양 중금속 함량이 높아진 것으로 판단되었다. 그리고 미사질식양토의 Cd, Pb, Zn과 Hg 함량도 다른 토성에 비해 높은 경향이었으나 유의적인 차이는 없었다.

Table 3. Heavy metal concentrations in upland soils by soil texture in Gyeongnam Province.

Soil texture (sample)	pH	OM	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cr ⁶⁺	Hg
	(1:5)	g kg ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----								
Sandy loam (28)	6.5a [†]	27a	0.14a	12.71b	9.97c	10.45a	91.73a	1.26b	24.79b	0.009a	0.044a
Loam (113)	6.6a	29a	0.16a	19.82ab	17.04b	16.90a	101.34a	3.58ab	32.46ab	0.008a	0.050a
Silt loam (31)	6.5a	26a	0.13a	19.35ab	17.34b	16.67a	100.08a	3.18ab	29.85b	0.006a	0.047a
Silty clay loam (4)	7.0a	26a	0.15a	23.83a	27.71a	19.07a	108.87a	5.63a	43.68a	0.006a	0.090a
Threshold limit			4	150	100	200	300	25	-	5	4

[†]Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

발토양 중금속 상관관계 분석 경남지역 발토양의 pH 및 유기물과 중금속 함량의 상관관계는 Table 4와 같다. 토양과 결합된 중금속의 생체 이용률은 pH와 밀접한 관련이 있다 (Zhang et al., 2018). 발토양의 pH는 Cu, Cd, Zn 함량과 유의적인 정의 상관관계를 나타내었고, Cr⁶⁺과 Hg와는 부의 상관관계를 보였다. 이는 Jung et al. (1998)이 우리나라 전역의 발토양을 조사해 보고한 결과와 유사하게 나타났다. 유기물은 Cu, Zn, Cr⁶⁺, Pb, Hg와는 유의적인 정의 상관을 보였다. 일반적으로 유기물의 사용은 토양 물리적인 성질과 비옥도를 개선하고 중금속을 흡착함으로 토양 용액의 중금속 함량을 줄이는데 효과가 있다 (Gul et al., 2015; Zia et al., 2018). 그러나 가축분이 함유된 유기물을 공급하게 되면 토양에 Zn, Cu와 기타 중금속의 축적이 발생할 수 있다 (Ingelmo et al., 2012; Jakubus et al., 2013). 발토양 Cd 함량은 Cu, Pb, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였으며, Cr⁶⁺과는 부의 상관관계를 보였다. 발토양의 Cu 함량은 Ni, Pb, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였고, Cr 함량과는 유의적인 상관관계를 보였다. Ni 함량은 As 함량과 Cr 함량과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였고, Cr⁶⁺과는 부의 상관관계를 보였다. Pb 함량은 Zn 및 As

Table 4. Correlation coefficient between heavy metals and soil organic matter of upland soils in Gyeongnam Province ($n=176$).

	OM	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Cr	Cr ⁶⁺	Hg
pH	0.142	0.176* [†]	0.308***	0.010	0.084	0.180*	0.085	0.032	-0.010	-0.002
OM		0.100	0.353***	0.037	0.166*	0.352***	0.130	0.138	0.299***	0.175*
Cd			0.404***	0.062	0.332***	0.408***	0.433***	0.056	-0.017	0.012
Cu				0.236**	0.458***	0.713***	0.310***	0.181*	0.069	0.119
Ni					0.035	0.112	0.313***	0.682***	-0.052	0.000
Pb						0.615***	0.276***	0.063	-0.079	0.170
Zn							0.248***	0.109	0.066	0.125
As								0.174*	0.075	0.052
Cr									-0.043	-0.006
Cr ⁶⁺										0.044

[†] * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

함량과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였고, Cr⁶⁺과는 부의 상관관계를 보였다. Zn 함량은 As 함량과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였고, As 함량과 Cr 함량은 유의적인 정의 상관을 보였다. 경남지역 176개소의 밭토양 중금속 함량은 모두 우려기준 이하였으나 친환경농업을 지속적으로 유지하기 위해서는 체계적인 유기물 공급과 모니터링이 필요할 것이다.

Conclusions

밭토양은 지리적 및 지형적인 영향으로 비옥도가 낮아지기 쉽고, 논이나 시설원예지보다 잡초 및 병해충에 더 많이 노출되기 쉬워 퇴비와 화학비료 및 유기합성 농약의 의존도가 상대적으로 높은 편이며, 토양이 산성화되기 쉬워 이로 인한 중금속의 집적과 용출, 작물로의 이동 가능성이 높은 특성에 주의하여야 한다. 경남지역 밭토양의 중금속 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 176지점을 대상으로 2017년에 토양의 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, Cr⁶⁺ 및 Hg 함량을 분석하였다. 밭토양의 재배작물에 따른 토양 중금속 함량은 배추에서 Cd 이 0.56 mg kg⁻¹, Cu 이 24.58 mg kg⁻¹, As 이 8.01 mg kg⁻¹로 가장 높았다($P < 0.05$). 그리고 Cd와 Cu, Pb, Zn의 함량의 경우 하해혼성평탄지에서 0.64 mg kg⁻¹, 37.95 mg kg⁻¹, 27.37 mg kg⁻¹, 149.74 mg kg⁻¹로 가장 높게 나타나는 경향을 보였다. 밭토양의 pH는 Cu와 고도로 유의적인 정의 상관을 보였고, 유기물은 Cu, Zn, Cr⁶⁺과 고도로 유의적인 정의 상관을 보였다. 그리고 경남지역 밭토양의 중금속 평균 함량은 토양오염우려기준에 비해 Hg 0.1%, Cr⁶⁺ 0.2%, Cd 3.8%, Pb 7.9%, Cu 12.5%, As 12.8%, Ni 16.2%, Zn 33.3% 수준으로 안전하였다.

Acknowledgement

This study was conducted with the support of the Research Cooperating Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ012505212018), RDA, Republic of Korea.

References

- Ahn, B.K., J.H. Lee, K.C. Kim, D.C. Choi, J.H. Lee and S.S. Han. 2010. Investigation of relationships between soil physico-chemical properties and topography in Jeonbuk upland fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:268-274.
- Bhargava, A, F.F. Carmona, M. Bhargava, and S. Srivastava. 2012. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manage.* 105:103-120.
- Giromini, C., R. Rebutti, E. Fusi, L. Rossi, F. Saccone, and A. Baldi. 2016. Cytotoxicity, apoptosis, DNA damage and methylation in mammary and kidney epithelial cell lines exposed to ochratoxin. *Cell Biol. Toxicol.* 32:249-258.
- Go, W.R., J.Y. Kim, J.H. Yoo, J.H. Lee, A. Kunhikrishnan, J.M. Lee, K.H. Kim, D.H. Kim and W.I. Kim. 2012. Monitoring of heavy metals in agricultural soils from consecutive applications of commercial liquid pig manure. *Korean J. Environ. Agric.* 31:217-223.
- Gul, S., A. Naz, I. Fareed, A. Khan, and M. Irshad. 2015. Speciation of heavy metals during co-composting of livestock manure. *Pol. J. Chem. Technol.* 17:19-23.
- Ingelmo, F., M.J. Molina, M. Desamparados Soriano, A. Gallardo, and L. Lapeña. 2012. Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost. *J. Environ. Manage.* 95:104-109.

- Jakubus, M., J. Dach, and D. Starmans. 2013. Bioavailability of copper and zinc in pig and cattle slurries. *Fresen. Environ. Bull.* 22:995-1002.
- Jiang, R., M. Wang, W. Chen, and X. Li. 2018. Ecological risk evaluation of combined pollution of herbicide siduron and heavy metals in soils. *Sci. Total Environ.* 626:1047-1056.
- Jung, G.B., H.C. Kim, K.Y. Jung, B.K. Jung and W.I. Kim. 1998. Heavy metal contents in upland soils and crops of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:225-232.
- Lee, Y.H., Y.K. Sonn, and Y.S. Ok. 2012. Investigation of heavy metal concentrations in paddy soils of Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:399-403.
- Lu, A.X., J.H. Wang, X.Y. Qin, K.Y. Wang, P. Han, and S.Z. Zhang. 2012. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Sci. Total Environ.* 425:66-74.
- Mbarki, S., A. Cerdà, M. Zivcak, M. Brestic, M. Rabhi, M. Mezni, N. Jedidi, C. Abdelly, and J.A. Pascual. 2018. Alfalfa crops amended with MSW compost can compensate the effect of salty water irrigation depending on the soil texture. *Process Saf. Environ.* 115:8-16.
- McLaughlin, M.J., B.A. Zarcinas, D.P. Stevens, and N. Cook. 2000. Soil testing for heavy metals. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:1661-1700.
- ME (Minister of Environment). 2015. Standard test method for soil pollution. Sejong, Korea.
- Park, N.K., J.P. Lee, S.D. Park, B.S. Choi, and B.J. Kim. 1999. Effects heavy metal contents in soil on the growth of and their uptake by red pepper. *Korean J. Environ. Agric.* 18:24-27.
- RDA (Rural development administration). 1983. Soil in Korea. RDA, Suwon, Korea.
- Rees, F., M.O. Simonnot, and J.L. Morel. 2014. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *Eur. J. Soil Sci.* 65:149-161.
- SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.
- SIS (Korean Soil Information System). 2018. <http://soil.rda.go.kr/>
- Son, D., H.J. Cho, J.Y. Heo, B.J. Lee, K.P. Hong, and Y.H. Lee. 2017. Assessment of heavy metal concentrations in greenhouse soils of Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:383-390.
- Temmerman, L.D., L. Vanongeval, W. Boon, M. Hoening, and M. Geypens. 2003. Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium. *Water Air Soil Poll.* 148:61-76.
- Wang, J., H. Wang, Y. Cao, Z. Bai, and Q. Qin. 2016. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area. *Sci. Rep.* 6:22058.
- Wen, J., Z. Li, N. Luo, M. Huang, R. Yang, and G. Zeng. 2018. Investigating organic matter properties affecting the binding behavior of heavy metals in the rhizosphere of wetlands. *Ecotox. Environ. Safe.* 162:184-191.
- Willscher, S., L. Jablonski, Z. Fona, R. Rahmi, and J. Wittig. 2017. Phytoremediation experiments with *Helianthus tuberosus* under different pH and heavy metal soil concentrations. *Hydrometallurgy* 168:153-158.
- Zhang, J., H. Li, Y. Zhou, L. Dou, L. Cai, L. Mo, and J. You. 2018. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China. *Environ. Pollut.* 235:710-719.
- Zhuang, P., M.B. McBride, H. Xia, N. Li, and Z. Li. 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine. South China. *Sci. Total Environ.* 407:1551-1561.
- Zia, A., L. van den Berg, M.N. Ahmad, M. Riaz, D. Zia, and M. Ashmore. 2018. Controls on accumulation and soil solution partitioning of heavy metals across upland sites in United Kingdom (UK). *J. Environ. Manage.* 222:260-267.