

폐광지 분포 식물 낙엽의 분해에 미치는 중금속의 영향^{1a}

심재국² · 손지희² · 신진호³ · 양금철^{3*}

The Effect of Heavy Metal Content on the Decomposition of Plant Litter in the Abandoned Mine^{1a}

Jae-Kuk Shim², Ji-Hoi Son², Jin-Ho Shin³, Keum-Chul Yang^{3*}

요약

본 연구는 중금속이 낙엽의 분해에 미치는 영향을 알아보기 위하여 충남 청양의 폐광광의 광미에 분포하는 쑥 (*Artemisia princeps* var. *orientalis*)과 쇠뜨기(*Equisetum arvense*)를 이용하여 실험하였다. 광미는 높은 중금속 함량과 낮은 유기물 함량을 가지고 있었다. 광미의 중금속 함량은 대조구 토양에 비해 비소(As)는 약 13배, 카드뮴(Cd)은 약 28배 높은 것으로 나타났다. 또한 크롬(Cr), 니켈(Ni) 및 아연(Zn)은 약 3배에서 6배 높게 측정되었다. 광미와 대조구 토양에서 채집한 식물체내의 중금속 함량은 광미에서 채집한 식물에서 현저히 높게 나타났으며, 쑥 잎의 경우 As는 약 23배, Cd은 25배 높게 나타났으며, 쇠뜨기 지상부의 경우 As는 58배, Cd은 11배 높은 것으로 나타났다. 대조구에서 분해 결과 중금속 농도가 높은 쑥의 잎과 대조구에서 채취한 잎이 각각 50.4%, 65.7%가 분해되었다. 또한 광미에서 진행된 분해 결과 쑥의 잎은 폐광지역에서 채취한 잎과 대조구에서 채취한 잎이 각각 31.6%, 57.5%가 분해되었다. 쑥의 줄기의 분해결과도 잎의 분해율과 비슷한 양상을 나타내었다. 쇠뜨기의 지상부의 분해는 대조구에서 분해된 결과 광미에서 채집된 쇠뜨기와 대조구에서 채집한 쇠뜨기가 각각 77.8%와 89.3%가 분해되었으며, 광미지역에서 분해 결과 각각 67.6%와 82.1%가 분해된 것으로 나타났다. 따라서 광미에서 생육하는 식물체의 중금속의 함량이 높을수록 분해가 느린 것으로 나타났으며, 이는 중금속이 낙엽의 분해에 영향을 미친 것이라고 판단된다.

주요어: 분해율, 광미, 쑥, 쇠뜨기

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the differences between the heavy metal contaminated and non-contaminated *Artemisia princeps* var. *orientalis* and *Equisetum arvense* in litter decomposition processes. The plant samples were collected from abandoned mine tailings and control sites in Cheongyang, South Korea. The abandoned mine tailings have high heavy metal concentration and low soil organic matter contents. The heavy metal contents of mine tailings were about 13 and 28 times higher in As and Cd, compared to those in control soils. Also, the contents of the Cr, Ni and Zn in mine tailings were about 3 to 6 times higher than those in control soil. Samples of two plant species

1 접수 2010년 2월 9일, 수정(1차: 2010년 4월 19일, 2차: 2010년 5월 18일), 게재확정 2010년 5월 19일
Received 9 February 2010; Revised(1st: 19 April 2010, 2nd: 18 May 2010); Accepted 19 May 2010

2 중앙대학교 생명과학과 Department of Life Science, Chung Ang Univ., Seoul(156-756), Korea

3 공주대학교 건설환경공학부 Division of Civil and Environmental Engineering, Kongju National Univ., Cheonan(330-717), Korea

a 이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 313-2007-2-C00738).

* 교신저자 Corresponding author(yangkc@kongju.ac.kr)

from mine tailings have high heavy metal concentrations compared to those from control sites. The leaf of *A. princeps* var. *orientalis* and shoot of *E. arvense* collected from mine tailings have approximately 23 and 58 times more in As, and 25 and 11 times more in Cd. The mass loss rates of plant litter from mine tailings were slower than those from control sites. During the experimental period, the decomposition of *A. princeps* var. *orientalis* leaf from mine tailings and control site showed 50.4% and 65.7% mass loss on the control soil area, respectively. The decomposition of *A. princeps* var. *orientalis* leaf from mine tailings and control site showed 31.6% and 57.5% mass loss on the mine tailings area, respectively. The decomposition of *A. princeps* var. *orientalis* stem from mine tailings and control site showed similar patterns with their leaf decomposition. The decomposition of *E. arvense* shoot from mine tailings and control site showed 77.8% and 89.3% mass loss on the control soil area, respectively. The decomposition of *E. arvense* shoot from mine tailings and control site showed 67.6% and 82.1% mass loss on the mine tailings area, respectively. Therefore, the higher contents of heavy metals showed slow decomposition. The results suggested that heavy metal contamination affected the plant litter decomposition processes.

KEY WORDS: MASS LOSS RATE, ABANDONED MINE TAILING, ARTEMISIA PRINCEPS VAR. ORIENTALIS, EQUISETUM ARVENSE

서론

낙엽 분해의 과정은 생태계 내에서 필수 원소의 순환에 가장 중요한 과정이다. 이러한 낙엽분해 과정이 어떤 요인에 의해 제약을 받으면 생산자인 식물이 이용 할 수 있는 영양원소의 공급이 감소하게 되어 생태계의 기능이 방해를 받게 된다.

국내에서 폐광산의 중금속에 대한 연구는 주로 폐광산 지역의 하천 오염과 광산 주변 식물의 중금속 흡수능을 밝힌 연구(Lee and Lee, 1996; Kim *et al.*, 1997; Ok *et al.*, 2003; Jeon and Choi, 2006)와 Cr, Ni, Co의 함량이 높고 K, Na, P 등의 영양원소가 부족한 자연 상태의 사문암 토양에서의 식물체 중금속 함량과 식생에 대한 연구가 있다(Kim *et al.*, 1997). 또한 폐광지역의 오염된 토양을 식물을 이용해 정화하기 위한 연구(Kim *et al.*, 1999)와 광산 주변의 중금속 분포양상에 따른 인근 농경지와 하천수계에 미치는 영향(Lee *et al.*, 1997)에 대한 연구가 있었다.

McEnroe and Helmisaari(2000)는 토양 내 중금속의 농도차이에 따른 소나무 잎의 분해율을 보기 위하여 광산지역에서 가까운 곳에서부터 먼 곳까지 분해실험을 진행한 결과 광산지역에 가까울수록 Cu와 Ni의 함량은 높았으며 분해율도 낮아졌고, Cu와 Ni은 분해과정 중 후기분해에 영향을 준다고 하였다. Bååth(1989)는 중금속 함량을 조절한 토양에서 낙엽분해 실험을 수행하여 낙엽의 분해는 토양의 중금

속 함량에 의해 억제되고 있음을 보고하였다.

본 연구는 중금속을 많이 함유하고 있는 청양 폐광산 지역에 생육하는 식물과 오염되지 않은 지역의 식물을 이용하여 식물체 내의 중금속 함량을 측정하고, 분해실험을 통해 중금속이 분해에 미치는 영향을 알아보았다.

재료 및 방법

1. 실험 장소의 특징

실험에 사용한 식물체의 채집과 야외 실험을 진행한 곳은 충청남도 청양군 운곡면 신대리(북위 36°30'59", 동경 126°52'59")일대로서 현재는 광미가 적치된 폐광지역이다(Figure 1). 이 곳은 금, 은, 아연 광산으로 등록되었던 곳으로서 2001년 폐광되었다(Kwon, 2006). 본 연구지역의 기후적 특성은 7, 8월에 강우가 집중되는 하계 다우형이며, 연평균 강수량은 1,237 mm이며, 연평균 기온은 12.1°C이다.

2. 실험종의 선정과 litterbag 설치

실험에 사용된 식물 종은 폐광산 지역과 대조구에 모두 분포하는 종으로서 식물체내의 중금속 함량 차이가 큰 쑥과 쇠뜨기를 선택하였다. 채취한 식물체는 증류수를 약하게 흘러 내리며 식물체 곁에 묻은 토양을 제거하였고, 60°C에서

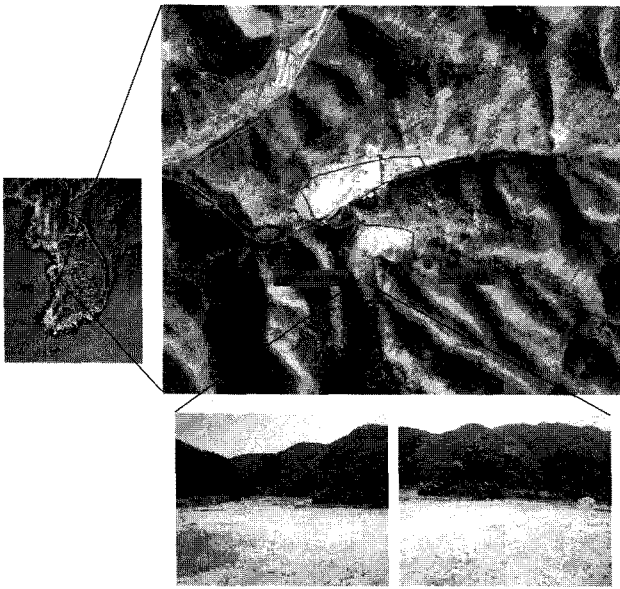


Figure 1. Map showing the study site

항량 건조시킨 후 각 실험에 사용하였다.

항량 건조시킨 식물체는 litter bag(15 cm × 15 cm, polyethylene, 1mm × 1mm mesh)에 3g씩 넣고 폐광산 지역과 대조구 지역에 설치하였다. 폐광산 지역에서는 litter bag 위를 대조구와 같은 조건을 만들기 위해 폐석지로 얇게 덮었으며, 대조구에서는 litter층과 혼합되도록 설치하였다. 2007년 12월 22일 폐광산지역과 대조구에 각각 98개의 litter bag을 설치한 후, 105일, 165일, 225일, 284일에 각각 24개의 litter bag을 회수하였다. 회수된 litter bag은 증류수에 세척하여 토양을 제거하고 60°C에서 항량 건조 후 건중량을 측정하여 초기 중량에 대한 감소량을 구하였다.

3. 토양 및 식물체 분석

광미와 대조구의 토양은 낙엽층과 humus층을 제거한 후 표층 토양을 채취하여 각 실험에 사용하였다. 토양의 유기물 함량은 작열소실법을 이용하였으며, 토양 pH는 샘플과 증류수를 1:5로 혼합하여 섞은 후 상등액을 취해 pH

meter(Corning 345 pH meter)를 이용하여 측정하였다. 광미와 대조구에서 채취한 식물체와 매회 회수한 litter를 60°C의 건조기에서 48시간 이상 항량이 될때까지 건조시킨 후, 1 mm mesh를 통과하도록 Wiley mill(GE Motors: 5KH39QN5525A)로 갈아 원소함량 분석에 사용하였다.

토양과 식물체의 중금속 농도는 Helrich(1990)의 방법에 따라 전처리 후 ICP(Inductively coupled Plasma Spectrometry: ICPS-7510)로 측정하였다. 각 토양과 식물체 시료에 대한 측정은 4반복으로 측정되었으며, 그 함량은 평균값으로 표현하였다.

4. 통계분석

폐석지지역과 대조구 지역의 비교는 두 집단간의 독립표본검정(T-test)을 실시하였으며, 통계학적 분석은 SPSS 12.0을 이용하였으며 유의수준은 5%와 1%를 기준으로 하였다.

결과 및 고찰

1. 토양 특성

토양의 유기물 함량은 광미가 2.34%, 대조구가 7.55%를 나타내었고, pH는 광미가 6.48, 대조구 토양이 5.04로 측정되었다. 광미와 대조구 토양에서 원소 함량은 광미에서 대조구 토양에 비해 As는 약 13배, Cd은 28배, Cr, Ni, Zn의 경우 약 3.2~6.4배 높은 것으로 나타났다(Table 1).

Lee et al.(1997)의 연구결과 폐광지역의 광미에서 As, Cd 및 Zn의 농도가 각각 79.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 5.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 및 129.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 보고되었고, Kim(2005)의 연구에서 광미의 As 함량이 대조구 토양에서 보다 3.7~12배, Cr은 2.4~4.2배, Zn은 5~12.2배 높은 것으로 보고되어 본 연구결과보다 낮은 값을 보였다. 본 연구대상지인 삼광광산의 경우 2001년에 폐광되었으나 앞선 실험 대상지는 삼광 광산보다 10년에서 30년 먼저 폐광 또는 휴광 되어 채굴이 정지되어서 오랜 시간이 경과하여 자연적으로 광미의 중금속이 용탈되어 낮

Table 1. Physico-chemical characteristics of soil. Mean ± standard deviation(n=4)

	pH	Organic matter Contents (%)	Heavy metal concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				
			As	Cd	Cr	Ni	Zn
Mine tailings	6.48*±0.71	2.34**±0.27	454.8**±141.4	8.5**±4.2	282.2**±54.1	111.5**±29.2	205.6**±27.6
Control soil	5.04±0.30	7.55±1.78	34.9±1.9	0.3±0.1	44.2±1.8	21.3±0.6	63.4±1.2

*: p<0.05, **: p<0.01

은 결과치를 보인 것으로 판단된다.

2. 식물체의 중금속 함량

폐광 지역과 대조구 지역에서 채집한 식물체 내의 중금속 함량은 썩과 쇠뜨기 모두 중금속 함량이 광미에서 생육하는 식물체에서 높은 함량을 보였으며, As는 썩 잎의 경우 폐광 지역에서 채취한 식물체에서 23배 높게 나타났으며, Cd는 25배 높게 나타났다. 쇠뜨기 지상부의 경우 As는 58배, Cd는 11배가 폐광지역에서 채취한 식물체에서 높게 나타났다 (Table 2).

Kim et al.(1999)의 연구대상지 중 제2 연화광산에서는 썩의 지상부에서 Cd의 함량이 22.85 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Zn의 함량이 1,192 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 보고되었다. 이는 본 연구 결과에 비해 Zn의 함량이 약 10배 높은 값으로서 제2 연화광산이 Zn, Pb 및 Cu를 채광하던 광산이었기 때문으로 판단된다.

Jung et al.(1993)의 결과에서는 썩의 Cd와 Zn의 함량이 9.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 과 197.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 쇠뜨기에서 각각 7.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 와 583.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 본 연구결과에 비해 높은 값을 나타내었다 (Table 2). 이는 실험 장소가 아연광산으로 이용되었기 때문에 토양과 식물체에 Zn의 함량이 높기 때문으로 판단된다.

3. Litter의 건중량 변화

중금속함량이 높은 식물체의 분해가 늦게 진행되었으며, 광미에서 분해된 식물체의 분해율이 더 낮은 것으로 나타났다(Figure 2, Figure 3).

광미에서 채집한 썩과 쇠뜨기, 대조구에서 채집한 썩과 쇠뜨기를 대조구에서 분해시킨 결과 중금속 함량이 높은 썩의 잎이 50.4%, 쇠뜨기 지상부가 77.8%, 분해되었고, 대조구 썩 잎이 65.7%, 쇠뜨기 지상부가 89.3% 분해되었다.

같은 방법으로 광미에서 분해시킨 결과 중금속 함량이

높은 썩 잎이 31.6%, 쇠뜨기 지상부가 67.6%, 대조구 썩 잎이 57.5%, 쇠뜨기 지상부가 82.1% 분해되었다. 따라서 대조구와 광미에서 분해시킨 결과 썩 잎과 쇠뜨기 지상부 모두 중금속 함량이 높은 식물체에서 더 낮은 분해율을 보였다. 또한 같은 식물체를 대조구에서 분해한 결과 광미에서 채집한 식물체의 분해율이 더 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Kim(2007)이 연구한 Ni과 Cr의 함량이 높은 사문암 지대와 비사문암 지대 식물체를 비사문암 지대와 사문암지대에서 분해시킨 결과 사문암 지대 식물체의 분해율이 더 낮았다는 결과와 일치하는 결과이다.

Hattori(1996)는 실험실에서 Cd을 처리한 토양과 대조구 토양에서 분해시킨 벧집(rice straw)의 분해가 8주후 각각 10.5%, 29.5% 분해되어 Cd이 벧짚의 분해를 64.4% 억제하

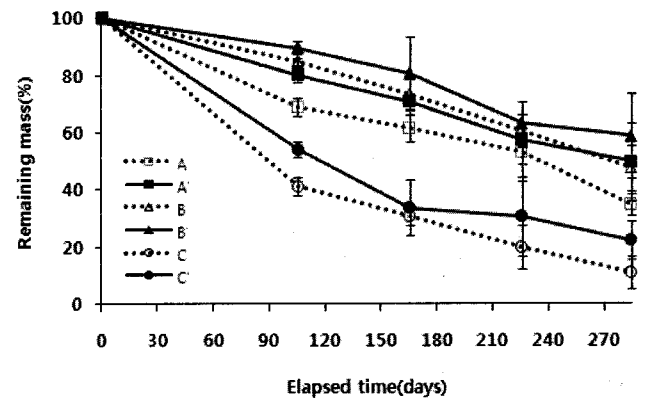


Figure 2. Mass loss of each species at the control site. A and A', leaf of *A. princeps* var. *orientalis* selected at non-mined and mined area; B and B', stem of *A. princeps* var. *orientalis* selected at non-mined and mined area; C and C', shoot of *E. arvense* selected at non-mined and mined area, respectively. Bars are standard deviation (n=4)

Table 2. Heavy metal concentration in each species from mine tailings and control site (mean \pm standard deviation, n=4)

Species	part	site	As	Cd	Cr	Ni	Zn
			$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
<i>A. princeps</i> var. <i>orientalis</i>	leaf	Mine tailings	56.6** \pm 0.5	4.9** \pm 0.2	8.6** \pm 0.2	15.8** \pm 1.2	94.7** \pm 5.6
		Control site	2.5 \pm 0.4	0.2 \pm 0.04	6.6 \pm 0.2	7.4 \pm 0.2	74.1 \pm 3.0
	stem	Mine tailings	24.** \pm 3.9	9.4** \pm 0.2	7.3** \pm 0.3	11.5** \pm 0.2	126.7** \pm 9.9
		Control site	3.8 \pm 0.2	0.3 \pm 0.01	4.5 \pm 0.01	5.4 \pm 0.2	78.7 \pm 1.4
<i>E. arvense</i>	shoot	Mine tailings	134.5** \pm 4.0	1.1** \pm 0.07	3.2** \pm 0.4	20.6** \pm 0.8	278.5** \pm 0.7
		Control site	2.3 \pm 0.8	0.1 \pm 0.01	1.5 \pm 0.1	9.7 \pm 2.4	230.9 \pm 22.2

** : p<0.01

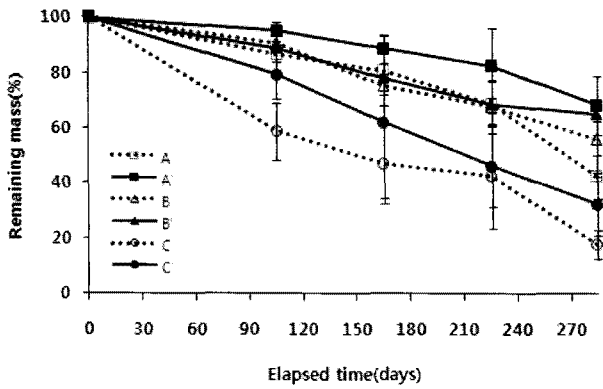


Figure 3. Mass loss of each species at the abandoned mine site. A and A', leaf of *A. princeps* var. *orientalis* selected at non-mined and mined area; B and B', stem of *A. princeps* var. *orientalis* selected at non-mined and mined area; C and C', shoot of *E. arvense* selected at non-mined and mined area, respectively. Bars are standard deviation (n=4)

였다고 보고하였다. 본 연구에서는 105일 후 광미와 대조구에서 분해시킨 썩 잎이 각각 13%, 31.2% 분해되어 중금속에 의해 58.3% 억제되었다. 이는 대상 식물종과 실험장소의

상이함으로 인해 값의 차이는 있으나, 중금속에 의해 분해가 억제되는 것은 같은 패턴이라 할 수 있다. Cotrufo *et al.*(1995)는 중금속 함량이 높은 낙엽과 대조군 낙엽으로 분해 실험을 한 결과 초기 2달 안에 중금속함량이 높은 낙엽이 대조군 낙엽보다 25% 덜 분해되었다고 보고하였다. 본 연구에서는 대조구에서 채집한 썩과 광미에서 채집한 썩을 대조구에서 분해시킨 결과 105일 후 광미에서 채집한 썩이 11.5% 덜 분해되었다. 이는 중금속의 함량 차이와 실험장소에 따른 주변 환경에 의해 식물체의 분해율이 달라진 것으로 판단된다.

3. Litter의 중금속 함량의 변화

대조구 지역에서 분해한 식물체의 중금속 함량의 변화는 Figure 4, Figure 5 및 Figure 6에 나타내었다. 대조구에서 채집한 썩 잎은 최종 회수시 As와 Cd의 값은 증가하였으며, Zn과 Ni의 함량은 감소하였다. 반면 광미에서 채집한 썩의 잎에서는 As, Cd, Zn 및 Ni 모두 감소하였다. 썩 줄기에서는 대조구에서 채집한 썩의 경우 Cd를 제외하고 최종 회수시 모두 감소하였으며, 광미에서 채집한 썩의 줄기의 중금속 함량은 모두 감소하였다. 쇠뜨기의 경우에도 썩의 잎과 같은 경향을 나타내었다. 즉 대조구에서 채집한 썩에

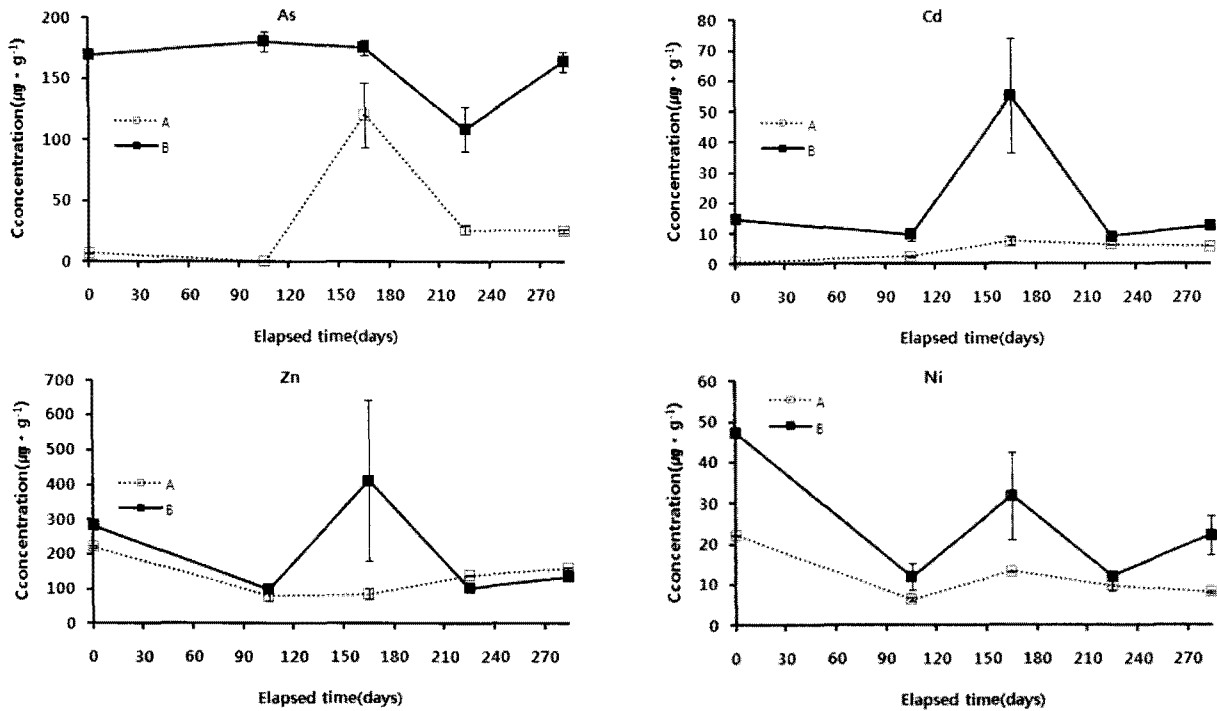


Figure 4. Change of heavy metal concentration at control site. A is leaf of *A. princeps* var. *orientalis* selected in control site, B is leaf of *A. princeps* var. *orientalis* selected in abandoned mine

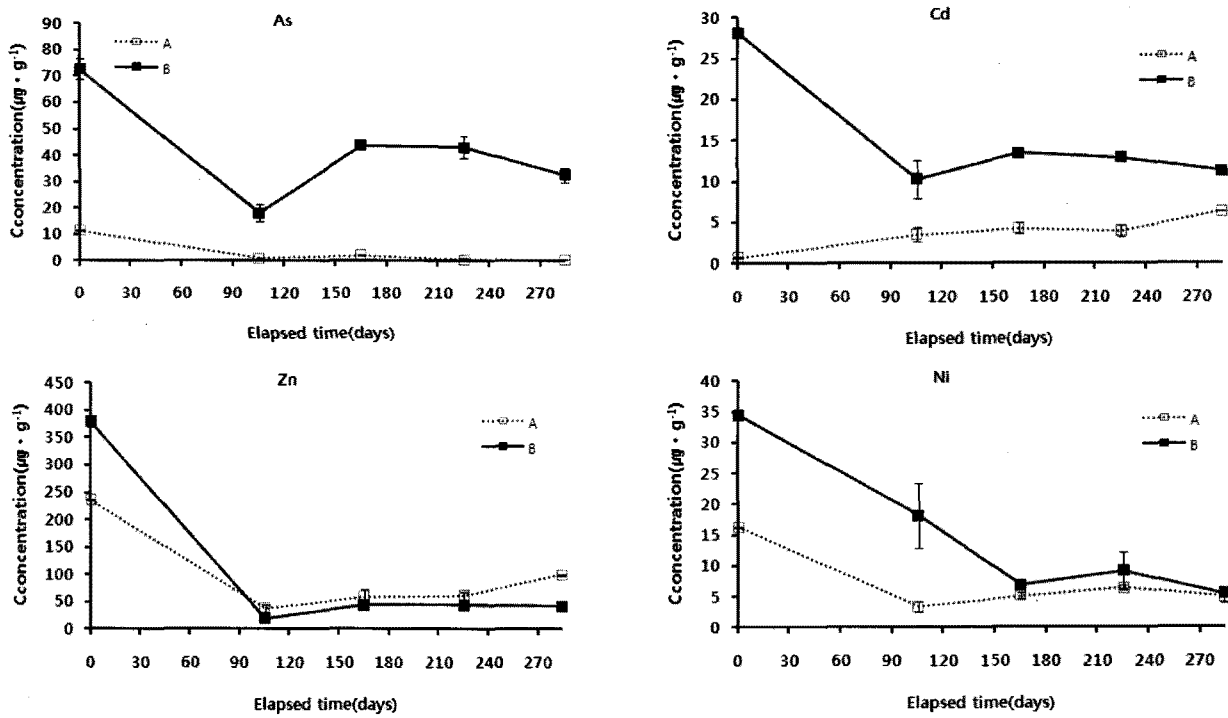


Figure 5. Change of heavy metal concentration at control site. A is stem of *A. princeps* var. *orientalis* selected in control site, B is stem of *A. princeps* var. *orientalis* selected in abandoned mine

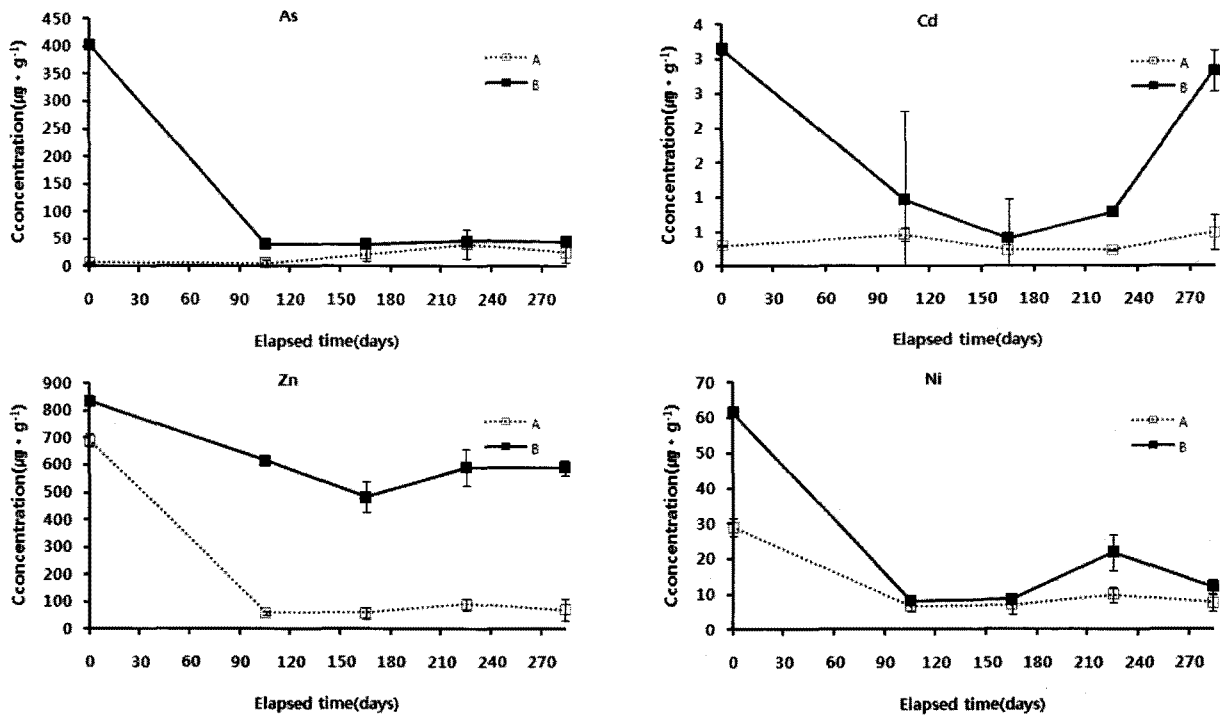


Figure 6. Change of heavy metal concentration at control site. A is shoot of *E. arvensis* selected in control site, B is shoot of *E. arvensis* selected in abandoned mine

