

납에 노출된 애기장대의 식물기관에 축적된 납 농도

박 종 범*

신라대학교 의생명과학대학 생물과학과

Received September 3, 2007 / Accepted September 21, 2007

Accumulated Concentration of Lead in Plant Organ of *Arabidopsis thaliana* Exposed to Lead. Jong Bum Park*. Dept. of Biological Sciences, Silla University, Busan 617-736, Korea - This study was to examine the accumulated concentration of lead in the organ of *Arabidopsis thaliana* grown in the soil added three different concentrations of lead. The accumulated concentrations of lead in the stem of plant grown in the soil added official standard concentration of lead of pollutant exhaust notified by the Ministry of Environment (1 mg/l), concentration ten times higher than the official standard concentration (10 mg/l) and concentration fifty times higher (50 mg/l) were similar to the rate of increase between three different concentrations, and increased average 24% compared with normal plant stem. The accumulated concentrations of lead in the leaf of plant grown in the soil added three different concentrations of lead were increased average 57% compared with normal plant leaf. And accumulated concentrations of lead in the leaf was no significant difference according to increase of lead concentration added in the soil as stem, the rate of increase was similar to between three different concentrations. The accumulated concentrations of lead in the root of plant grown in the soil added official standard concentration of lead of pollutant exhaust and concentration ten times higher were increased average 114% compared with normal plant root, but increased about 861% in the concentration fifty times higher than the official standard concentration. This result contrast with the data of stem and leaf. The accumulated concentration of lead in the plant body of *Arabidopsis thaliana* was increased according to increase of lead concentration added in the soil. Especially, the accumulated concentration of lead in the plant body grown in the concentration fifty times higher than the official standard concentration was increased about 2.6 times than normal plant. These results show that lead contaminated within the soil was more accumulated in the root than the stem or leaf, and accumulated concentrations of lead in the stem and leaf were not increased in proportion to the concentration of lead in the soil, but very increased in proportion to the concentration in the root.

Key words – *Arabidopsis thaliana*, lead, accumulated concentration, soil

서 론

오늘날 현대사회는 고도의 산업화로 인하여 공장에서 배출되는 각종 중금속류가 함유된 폐기물과 폐수가 급속히 증가하여 생태계의 오염을 가중시키고 있다. 중금속에 의한 수질, 대기 및 토양 등의 환경오염은 생물계에 중대한 영향을 미친다. 중금속에 의한 이러한 환경오염이 위험한 것은 특히 인체의 경우 미량이라도 체내에 축적되면 잘 배설되지 않고 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내기 때문이다[13]. 중금속은 비중이 4~5 이상인 금속을 말하는데, 수은, 납, 카드뮴 등과 같이 환경오염물질로서 생체에 해로운 영향을 미치는 금속을 유해중금속이라 한다. 중금속은 생체내로 흡수되면 생체내 물질과 결합하여 잘 분해되지 않는 유기복합체를 형성하기 때문에 몸 밖으로 빨리 배출되지 않고 간장, 신장 등의 실질장기나 뼈에 축적된다. 특히 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb),

카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 등은 낮은 농도에서도 건강장해를 유발할 가능성이 있는 물질이다[8].

납은 우리 생활환경과 밀접한 관계가 있는데, 납이 우리 체내에 들어오는 경우는 호흡기, 소화기 그리고 피부로 구분된다. 체내에 들어온 납은 들어온 경로에 관계없이 혈액에 흡수된 후 혈액 및 간, 콩팥과 같은 연부조직에 총 흡수된 납의 5% 미만만 남아 있고, 흡수된 납의 대부분(90% 이상)이 뼈속에 저장된다. 뼈속의 납은 물렁뼈에 약 20-30% 그리고 나머지가 정강이뼈 같은 딱딱한 뼈에 저장된다. 혈액의 납은 활성화된 상태로 조혈기관과 체내의 여러 장기에 직접적인 영향을 주는 반면 뼈속의 납은 비활성화된 상태로 비교적 안정된 상태로 오랫동안 저장된다. 혈액의 납은 체내에 남아있는 반감기가 짧아 약 3-6주 정도밖에 안되지만 뼈속의 납, 특히 경골의 경우 반감기가 10년이 넘는 경우가 많다.

중금속이 식물의 생장에 미치는 영향은 다양하다. 크롬, 카드뮴, 구리 등의 중금속은 식물 성장과 종자발아에 커다란 영향을 미치는 것으로 보고되었다[14]. 중금속이 식물의 광합성 기능과 기공 기작에 손상을 주는 것과 같은 심각한 증상들이 나타남에 따라 이러한 중금속 오염을 감소시키거나

*Corresponding author

Tel : +82-51-999-5472, Fax : +82-51-999-5176

E-mail : jbpark@silla.ac.kr

오염된 환경으로부터 중금속을 제거시키고자하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다[3,15]. 최근에는 십자화과 식물 중 배추속(*Brassica*)식물과 *Thlaspi caerulescens* 및 벼과 식물인 *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*을 이용하여 오염된 토양에서 카드뮴, 구리, 아연, 납 등과 같은 중금속을 제거하려는 연구가 많이 이루어지고 있다[6,11].

애기장대(*Arabidopsis thaliana*)는 십자화과 장대나물속의 일년생 초본식물로서 식물체 전체의 유전자 지도가 완성된 최초의 고등식물이며, 6-8주의 짧은 생활사를 가지고 있어서 식물학의 여러 분야에서 모델식물로 광범위하게 이용되고 있다[10,12]. 저자는 애기장대의 이런 장점을 이용하여 구리, 납, 크롬, 카드뮴 등의 중금속이 애기장대의 생장과 종자발아에 미치는 영향을 연구하여 보고한 바 있다[14]. 그러나 이러한 중금속에 노출된 식물에서 식물체 내의 각 영양기관에 축적된 중금속의 농도를 측정하는 연구결과는 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 연구는 이전 연구의 후속연구로 환경부고시 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배, 50배 높은 농도의 납을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 식물체의 줄기, 뿌리, 잎 등 각 영양기관에 축적된 납의 농도를 조사하여 고등식물의 생장에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다. 이러한 연구는 토양 속에 오염된 중금속 농도와 식물체 내에 축적된 중금속 농도와의 연관성과 식물체 각 영양기관에 축적된 중금속이 실제로 식물체의 생장에 어떠한 영향을 미치는지를 유추할 수 있게 하며, 중금속에 내성을 가지는 식물의 연구 또는 식물체를 이용한 중금속 제거에 대한 기초적인 자료를 제공하게 될 것이다.

재료 및 방법

실험재료

애기장대(*Arabidopsis thaliana*) 종자(Col-O)는 미국 Ohio State University의 Arabidopsis Biological Resource Center (ABRC)에서 분양받아 실험재료로 사용하였으며, 애기장대에 처리한 납은 시판중인 표준용액(Kanto Chemical Co.)을 구입하여 사용하였다.

재료식물의 재배

애기장대 종자를 peat moss와 질석, 펄라이트가 각각 1:1:1로 혼합된 인조 흙이 담긴 묘판에 파종한 후 랩을 씌워 2일 동안 4℃에서 저온처리한 다음 growth chamber에 옮겨서 배양하였다. Growth chamber내의 환경조건은 16 시간의 명처리와 8시간의 암처리로 조정된 광주기하에서 온도는 22±1℃로, 습도는 50-80%로 유지되도록 조절하여 주었다. 배양 약 2주 후면 싹이 나오는데 이때 랩을 제거하고 3-4일 마다 계속 수분상태를 점검하여 적절한 습도가 유지되도록 수시로 영양액을 공급하여 주었다[14].

납 용액 처리

애기장대 종자를 묘판에 파종한 후 growth chamber내에서 약 15일 정도 재배한 애기장대에 납을 3가지 농도로 각각 처리하였다. 환경부에서 고시한 오염물질 배출기준치 농도(1 mg/l)와 이보다 10배(10 mg/l), 50배(50 mg/l) 높은 농도로 제조한 납 용액을 1 l 영양액에 첨가하여 사용하였으며, 대조구는 납 용액이 첨가되지 않은 영양액만을 사용하였다. 납 용액 처리는 애기장대에 습도를 유지시키기 위하여 공급하여 주는 영양액에 납 용액을 농도별로 첨가하여 애기장대에 공급하여 주었다.

식물체내 납 측정

애기장대를 growth chamber에서 배양하는 동안 각각 다른 납 농도가 포함된 영양액과 납용액이 들어 있지 않은 영양액을 3~4일 간격으로 250 ml씩 묘판이 담긴 용기에 공급하여 45일간 배양한 후, 성체식물의 각 영양기관에 축적된 납의 농도는 원자흡광분광계(atomic absorption spectrophotometer)를 사용하여 측정하였다. 애기장대 식물체에 묻어 있던 흙을 깨끗이 세척하여 물기를 말린 다음 줄기, 뿌리, 잎 등을 분리하여 절단한 후 약 48시간 동안 동결 건조시킨 재료를 1 g씩 100 ml의 질산에 녹여서 시료를 만든 후 원자흡광분광계로 측정하였다.

결과 및 고찰

줄기 납 농도

여러 가지 농도의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 줄기 내에 축적된 납 농도를 측정하는 결과는 Fig. 1과 같다. 토양에 첨가한 납의 농도가 증가함에 따라 줄기 내에 축적된 납의 농도도 증가하였으나, 오염물질 배출기준농도(1 mg/l)와 이보다 10배 높은 농도(10 mg/l), 50배 높은 농도(50 mg/l)에서의 차이는 크지 않았다(Fig. 1). 영양액만을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 줄기에 축

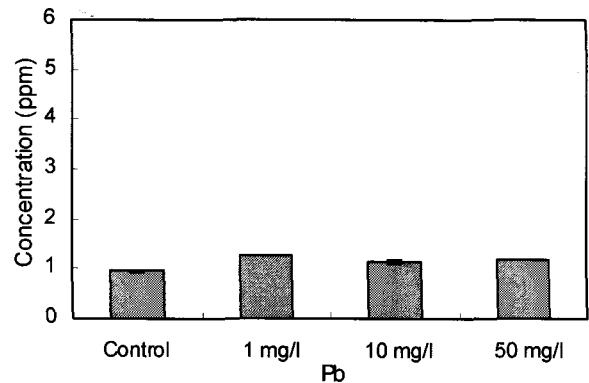


Fig. 1. Lead concentration in the stem of *Arabidopsis thaliana* treated with lead for 45 days.

적된 납의 농도와 비교하여 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 높은 농도, 50배 높은 농도의 납을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 줄기에 축적된 납의 농도는 농도별로 큰 차이없이 약 20% - 30% 증가하여 비교적 유사한 증가율을 나타내었다(Fig. 1). 이러한 결과는 여러 가지 농도의 납 용액을 애기장대에 처리하였을 때 줄기 생장에 미치는 영향을 조사한 결과, 오염물질 배출기준 농도인 1 mg/l에서는 정상 식물의 줄기보다 약 15% 정도 생장이 감소하였고, 이보다 10배 높은 농도인 10 mg/l에서는 약 13% 정도 생장이 감소하였으나, 50배 높은 농도인 50 mg/l를 처리한 식물에서는 약 41% 줄기 생장이 감소하였다는 연구보고[14]와는 비교되는 결과이다[14]. 이러한 연구보고는 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 납 농도를 처리한 애기장대의 줄기 생장 감소는 오염물질 배출기준농도와 이보다 10배 높은 납 농도를 처리한 애기장대의 줄기 생장 감소보다 더 많이 감소되었음을 나타내고 있다. 따라서 이와 같은 연구보고와 본 실험결과는 토양 속에 오염된 납의 농도가 증가함에 따라 줄기 생장은 다소 감소하였으나 줄기 속에 축적되는 납의 농도는 비례하여 증가하지 않았음을 나타내고 있다. 어떤 식물은 토양으로부터 비교적 많은 양의 중금속을 흡수하여 조직내에 격리시키는데, 이러한 식물을 금속 hyperaccumulator라고 한다[2]. 십자화과 식물인 *Thlaspi caerulescens*은 토양속의 아연과 카드뮴농도보다 약 10배나 높은 아연과 카드뮴을 경엽부에 축적하고 있는 것으로 보고되었다[1]. 또한 식물이 체내에 중금속이 축적되면 자체적으로 중금속 결합 단백질인 phytochelatins를 생합성시켜 유리 중금속의 농도를 낮추어 중금속에 대한 해독작용을 하는 것으로 알려져 있다[17].

잎 납 농도

여러 가지 농도의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 잎 내에 축적된 납 농도를 측정된 결과는 Fig. 2와 같다. 오염물질 배출기준농도(1 mg/l)와 이보다 10배 높은 농도(10 mg/l), 50배 높은 농도(50 mg/l)의 납을 첨가한

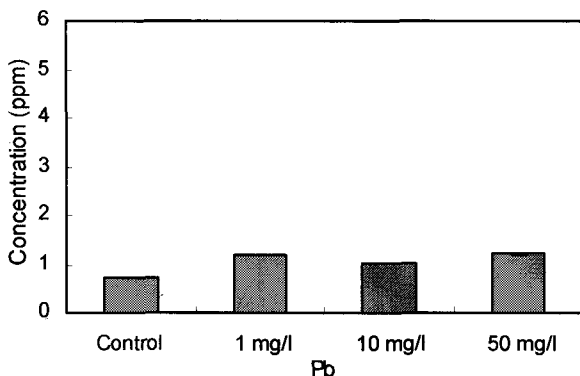


Fig. 2. Lead concentration in the leaf of *Arabidopsis thaliana* treated with lead for 45 days.

토양에서 성장한 애기장대의 잎에 축적된 납의 농도는 영양액만을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 잎에 축적된 납의 농도와 비교하여 약 45% - 60% 증가하여 농도별로 큰 차이가 없는 비교적 유사한 증가율을 나타내었다(Fig. 2). 이러한 결과는 납을 각 농도별로 처리한 애기장대의 전체적인 잎 생장을 정상 식물의 잎 생장과 비교, 관찰한 연구에서 오염물질 배출기준 농도와 이보다 10배 높은 농도 및 50배 높은 농도에서의 잎 생장이 정상식물의 잎 생장과 비교하여 차이가 거의 관찰되지 않았다는 연구보고[14]와 일치하는 결과이다. 이러한 연구보고는 토양 속에 첨가한 납의 농도가 증가함에 따라 애기장대의 잎 생장은 정상식물의 잎 생장과 비교하여 큰 차이가 없음을 보여준다. 이와 같은 연구보고와 본 실험결과는 토양 속에 오염된 납의 농도가 증가함에 따라 애기장대의 잎 생장은 거의 변화가 없으며 잎 속에 축적되는 납의 농도 또한 농도에 비례하여 증가하지 않았음을 나타내고 있다. 한편 니켈 hyperaccumulator인 *Psychotris douarrei*의 잎은 nonaccumulator인 *Ficus webbianai* 잎보다 약 180배나 더 많은 니켈을 축적하고 있으며, 또한 아연, 크롬, 코발트, 납은 각각 2.5배, 1.5배, 1.3배, 6.5배 더 높은 농도를 가지고 있었다는 연구보고도 있다[4].

뿌리 납 농도

여러 가지 농도의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 뿌리 내에 축적된 납 농도를 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. 토양에 첨가한 납의 농도가 증가함에 따라 뿌리 내에 축적된 납의 농도도 증가하는 경향을 나타내고 있었는데, 특히 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도에서는 비약적인 증가를 나타내었다. 영양액만을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 정상식물의 뿌리에 축적된 납의 농도와 비교하여 오염물질 배출기준농도(1 mg/l)와 이보다 10배 높은 농도(10 mg/l)의 납을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 뿌리에 축적된 납의 농도는 각각 약 100%, 128% 증가하였다(Fig. 3). 반면 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(50

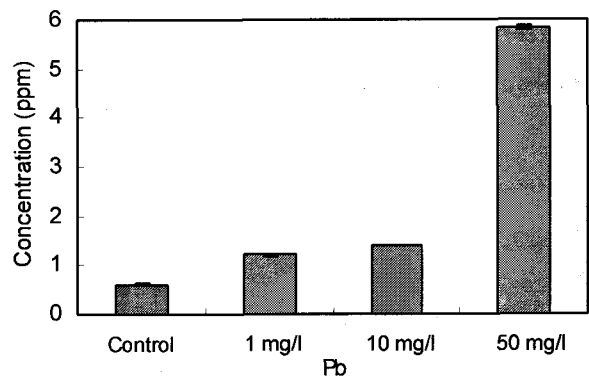


Fig. 3. Lead concentration in the root of *Arabidopsis thaliana* treated with lead for 45 days.

mg/l)의 납을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 뿌리에 축적된 납의 농도는 정상식물의 뿌리와 비교하여 약 861%라는 놀라운 증가율을 나타내었다(Fig. 3). 이것은 여러 가지 농도의 납 용액을 애기장대에 처리하였을 때 뿌리 생장에 미치는 영향을 조사한 결과(Fig. 4)와는 상반되는 결과이다. 애기장대의 뿌리 길이를 측정된 결과, 오염물질 배출기준 농도인 1 mg/l에서는 정상식물의 뿌리 길이와 거의 유사한 생장을 나타내었고, 이보다 10배 높은 농도인 10 mg/l에서는 정상식물의 뿌리보다 약 5% 정도 생장이 감소하였으나, 50배 높은 농도인 50 mg/l를 처리한 식물에서는 정상식물보다 약 10% 뿌리 생장이 감소하였다(Fig. 4). 이러한 결과는 오염물질 배출기준농도의 납 농도에서는 뿌리 생장이 정상식물의 뿌리 생장과 거의 차이가 없었으나, 납 농도가 증가할수록 비례하여 뿌리 생장이 다소 감소되었음을 나타내고 있다. 이와 같은 결과들은 토양 속에 오염된 납의 농도가 증가함에 따라 뿌리 속에 축적되는 납의 농도는 매우 증가하였으나 이것이 뿌리의 생장에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 나타내고 있다. 이것은 뿌리가 토양으로부터 영양분을 흡수하는 과정에서 뿌리표면은 영양분뿐만 아니라 많은 오염물과 결합하기 때문일 것으로 생각된다[11]. 인디안 겨자(*Brassica juncea*)는 뿌리조직 속에 카드뮴, 니켈, 납 등을 액체배지에서보다 500배 높은 농도까지 축적할 수 있으며[15,16], 해바라기 뿌리는 우라늄으로 오염된 물로부터 우라늄을 30,000배 농축하였고[5], 담배 뿌리는 1-5 ppm 수은이 포함된 액체배지에 노출되었을 때 배지속의 수은 농도를 거의 100배 정도 감소시켰다는 보고도 있다[7].

식물체내 납 농도

여러 가지 농도의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대의 식물체 내에 축적된 납 농도를 측정된 결과, 토양에 첨가한 납의 농도가 증가함에 따라 식물체 내에 축적된 납의 농도도 증가하는 경향을 나타내고 있었는데, 특히 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도에서는 매우 높은 증

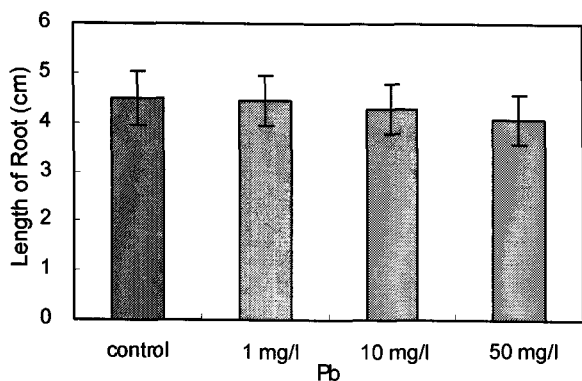


Fig. 4. Effects of lead on root growth of *Arabidopsis thaliana* treated with lead for 45 days.

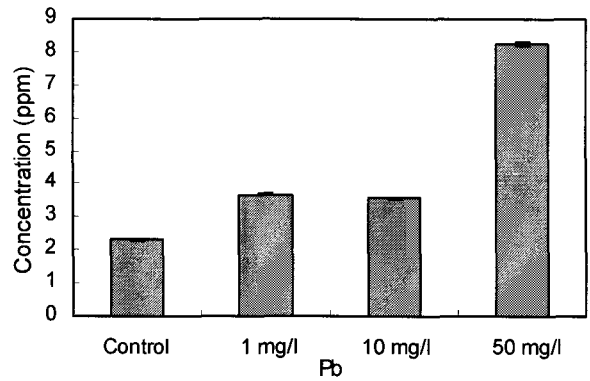


Fig. 5. Lead concentration of plant body of *Arabidopsis thaliana* treated with lead for 45 days.

가를 나타내었다(Fig. 5). 오염물질 배출기준농도(1 mg/l)와 이보다 10배 높은 농도(10 mg/l)의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 식물체 내에 축적된 납의 농도는 납 용액이 첨가되지 않은 토양에서 성장한 정상식물체에 축적된 납 농도보다 평균 약 57% 증가율을 나타내어 약 0.6배 증가하였다. 반면 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 농도(50 mg/l)의 납 용액을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대 식물체 내에 축적된 납의 농도는 정상식물체보다 약 258%의 높은 증가율을 나타내어 약 2.6배 가량 증가하였음을 보여주고 있다.

요 약

3가지 농도의 납을 첨가한 토양에서 성장한 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)에서 식물체에 축적된 납의 농도를 조사하였다. 환경부 고시 오염물질 배출기준 농도(1 mg/l)와 10배 높은 농도(10 mg/l) 및 50배 높은 농도(50 mg/l)의 납이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 줄기에 축적된 납의 농도는 3가지 농도에서 증가율이 유사하게 나타났으며, 정상식물 줄기에 비하여 평균 약 24% 증가하였다. 3가지 농도의 납이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 잎에 축적된 납의 농도는 정상식물 잎에 비하여 평균 약 57% 증가하였으며, 줄기와 마찬가지로 토양에 첨가된 납의 농도 증가에 따라 잎에 축적된 납의 농도는 유의한 차이는 나타나지 않았으며 증가율도 유사하였다. 반면 오염물질 배출기준 농도와 10배 높은 농도의 납이 첨가된 토양에서 성장한 식물의 뿌리에 축적된 납의 농도는 정상식물 뿌리에 비하여 평균 약 114% 증가하였으나, 50배 높은 농도에서는 약 861% 증가하여 줄기나 잎과는 대조적인 결과를 나타내었다. 토양 속에 첨가된 납의 농도가 증가하면 애기장대 식물체 내에 축적된 납의 농도도 증가하였는데, 특히 오염물질 배출기준농도보다 50배 높은 납이 첨가된 토양에서 성장한 식물체내에 축적된 납 농도는 정상식물보다 약 2.6배 증가하였다. 이러한 결과는 토양 속에 오염

된 납은 식물의 줄기나 잎보다는 뿌리에 더 많이 축적되며, 줄기와 잎에 축적되는 납 농도는 토양 속에 오염된 납 농도에 비례하여 증가하지 않으나 뿌리에서는 농도에 비례하여 매우 증가하였음을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

1. Baker, A. J. M., S. P. McGrath, C. M. D. Sidoli and R. D. Reeves. 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Res. Conserv. Rec.* **11**, 41-49.
2. Brooks, R. R., J. Lee, R. D. Reeves and T. Jaffre. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *J. Geochem. Explor.* **7**, 49-58.
3. Cunningham, S. D. and D. W. Ow. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiol.* **110**, 715-719.
4. Davis, M. A., S. G. Pritchard, R. S. Botd and S. A. Prior. 2001. Developmental and induced responses of nickel-based and organic defences of the nickel-hyperaccumulating shrub, *Psychotria douarrei*. *New Phytologist* **150**, 49-58.
5. Dushenkov, S., D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K. C. Ting and B. Ensley. 1997. Removal of uranium from water using terrestrial plants. *Environ. Sci. Technol.* **31**, 3468-3474.
6. Ebbs, S. D., M. M. Lasat, D. J. Brady, J. Cornish, R. Gordon and L. V. Kochian. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J. Environ. Qual.* **26**, 1424-1430.
7. Heaton, A. C. P., C. L. Rugh, N-J Wang, R. B. Meagher. 1998. Phytoremediation of mercury and methylmercury polluted soils using genetically engineered plants. *J. Soil Contam.* **7**, 497-509.
8. Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough and C. S. Cobbett. 1995a. A cadmium-sensitive, glutathione-deficient mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* **107**, 1067-1073.
9. Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough and C. S. Cobbett. 1995b. Cadmium-sensitive, *cad1* mutants of *Arabidopsis thaliana* are phytochelatin deficient. *Plant Physiol.* **107**, 1059-1066.
10. Langridge, J. 1994. *Arabidopsis thaliana*, a plant Drosophila. *BioEssays* **16**, 775-778.
11. Meagher, R. B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biol.* **3**, 153-162.
12. Meyerowitz, E. M. 1989. *Arabidopsis*, a really useful weed. *Cell* **56**, 263-269.
13. Nriagu, J. O. and J. M. Panyna. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* **333**, 134-139.
14. Park, Y. S. and J. B. Park. 2002. Effects of heavy metals on growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*. *J. Environ. Sci.* **11**, 319-325.
15. Salt, D. E., R. C. Prince, I. J. Pickering and I. Raskin. 1995. Mechanism of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.* **109**, 1427-1433.
16. Salt, D. E. and U. Kramer. 1999. Mechanism of metal hyperaccumulation in plant. pp 231-246, In *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-up the Environment*, Raskin, I. and B. D. Ensley (ed.), New York, John Wiley and Sons.
17. Vliet, C., C. R. Andersen and C. S. Cobbett. 1995. Copper-sensitive mutant of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* **109**, 871-878.