

인도네시아 반둥 남부 수방산지역에서의 토양지화학 탐사

김인준* · 이재호 · 이사로 · 서정률 · 김유봉 · 이규호

한국지질자원연구원

Soil Geochemical Exploration of the Mt. Subang Area of the Southern Part of the Bandung, Indonesia

In-Joon Kim*, Jae-Ho Lee, Sa-Ro Lee, Jeong-Ryul Seo, Yoo-Bong Kim and Gyo-Ho Lee

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The geochemical exploration was carried out of the soil systems in the survey areas(Mt. Subang area). The chemical values of soil samples for soil in this area are defined such as over values of Ag : 11 ppm(Average : 1.91 ppm), Au : 548 ppb(Average : 42.39 ppb), Cu : 89 ppm(Average : 51.40 ppm), Pb : 190 ppm(Average : 23.69 ppm), Zn : 157 ppm(Average : 61.78 ppm), respectively. Anomalous areas for each element have been chosen based on the factors such as, geologic settings, geochemical survey, chemical analysis of ore, chemical analysis of soil, statistical processing of the chemical analysis. Therefore, multi-elements anomalies area were recognized in the east-center part of the study area.

Key words : geochemical exploration, statistical processing, multi-elements, anomalous areas, Indonesia

인도네시아 반둥 남부 수방산지역에 대하여 정밀토양지화학탐사를 실시하였으며, 정밀지표지질조사도 병행하였다. 정밀토양지화학탐사에서 채취한 토양시료의 화학분석 값은 Ag : 11 ppm(평균함량 : 1.91 ppm), Au : 548 ppb(평균함량 : 42.39 ppb), Cu : 89 ppm(평균함량 : 51.40 ppm), Pb : 190 ppm(평균함량 : 23.69 ppm), Zn : 157 ppm(평균함량 : 61.78 ppm)이다. 또한 정밀토양지화학탐사를 실시하여 이들에 대한 화학분석치 결과와 통계처리를 한 결과 등 모든 데이터를 종합 분석한 결과, 연구지역 중동부지역에서 다원소 지화학이상대가 확인되었다.

주요어 : 지화학탐사, 통계처리, 이상대, 유망지역, 인도네시아

1. 서 론

정밀토양지화학탐사는 인도네시아 반둥 남부지역의 땅궁(Tanggeung), 수방산(Mt. Subang) 지역에서 수행되었다. 이 지역은 행정 구역상 인도네시아 자바섬에 위치한 반둥 남부지역으로(Fig. 1), 반둥에서 남서쪽 120 km 떨어져 있으며, 차로 5시간 정도 걸리는 곳에 위치한다. 지역은 지반고 약 200 m부터 144 m까지의 고도차가 심한 지역으로 절벽이 많이 발달한 험준한 지형이다. 본 조사지역은 인도네시아 1:25,000 수치지형도가 나와 있으며, 이 지형도를 기본으로 하여 조사를 실시하였다. 수계는 주 방향이 동서 방향이며, 지

류들은 남북방향이다. 땅궁지역은 대부분 신생대의 암석으로 마이오세의 응회암질 사암, 이암, 석회암 등의 퇴적암으로 구성된 층, 주로 응회암으로 구성된 층과 주로 화산각력암으로 이루어진 층 그리고 이들을 관입한 플라이오세의 안산암과 제4기의 테일러스층으로 대별될 수 있다.

쇄설성 하상퇴적물/토양퇴적물은 비교적 풍화에 강한 불용성의 입자들이 잔류되어 남아 있어 광상을 추적하는데 유용한 정보를 얻을 수 있다. 쇄설성 퇴적물내의 부동성 원소의 확산은 지표수에 의해 금속을 많이 함유하는 표층의 침식작용에 의해 이루어지며 표사와 중사 시료 채취는 조사하고자 하는 지역에 대

*Corresponding author: ijkim@kigam.re.kr

한 광체의 이차 확산과 암석학적 특징 등의 사항을 파악하기 위해 행해진다. 따라서 토양퇴적물에 대한 다원소분석의 결과는 금속광물의 이상대와 암석 지화학적인 변화를 지표시료로 도면화하여 나타낼 수 있다. 금번 연구의 목적은 조사지역에서 토양지화학탐사를 함으로서 보다 정확한 광상의 위치를 찾는 데 목적이 있다.

2. 지 질

이 지역의 지질은 하부로부터 응회암질 사암, 응회암 및 이들을 관입한 안산암으로 이루어지며 모두 제삼기에 해당한다(Fig. 1). 응회암질 사암은 연구지역의 중부에 대상으로 길게 분포하며 광역지질도에서 보면 사암층에 속하는 암석이며, 층리가 잘 발달되며 고화상태가 그다지 양호하지 않다. 응회암층은 조사지역의 중북부에 동서로 길게 분포한다. 이 층은 주로 덜 고화되었으며 층리가 잘 발달한 응회암 또는 결정질 응회암으로 구성되며 화산각력암의 일종인 안산암질 각

력암, 응회암질 각력암 등이 나타나기도 한다. 안산암은 연구지역의 남부와 북부에 분포하며, 현미경관찰에 의하면 사방회석과 단사회석, 사장석을 주 구성광물로 하는 휘석안산암으로, 화산암의 지화학적인 분류에 의하면 현무암질 안산암에 속한다.

3. 시료 채취 및 분석 방법

시료채취는 수방산 지역에 대해서 11개의 측선 각각에서 100 m 간격으로 8개의 시료를 채취하여 총 88개의 토양 시료를 채취하였다. 시료채취 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 시료채취는 인도네시아와 한국의 지질학자 팀에 의해 수행되었다. 토양시료는 상부의 토양을 제거한 후 토양제거 깊이에서 약 30-50 cm를 더 파서 약 10 Kg 정도를 대상으로 하여 80 mesh 이하의 입자들을 체질하여 채취하였으며, 이는 토양지화학시료의 정량화를 위하여 각각의 시료에 대하여 동일한 양을 채취하였다. 토양시료는 현장에서 공기 중에 건조하였으며, 시료들을 인도네시아 광물자원청(DMR)으로 옮겨 150

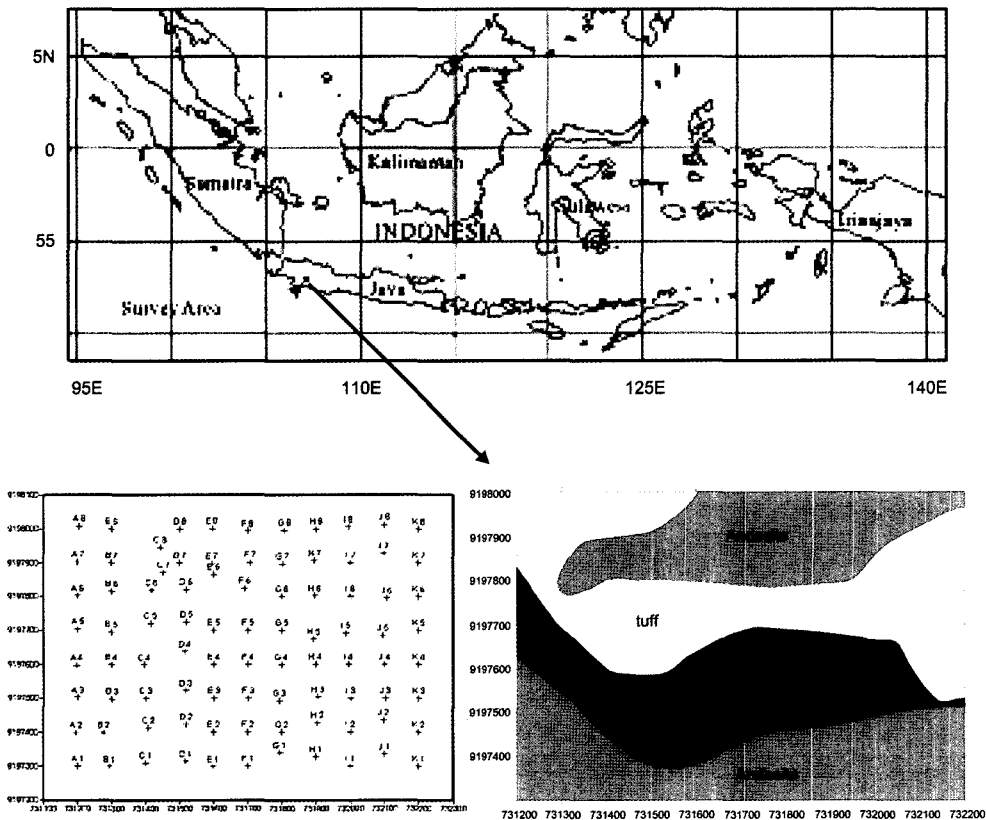


Fig. 1. The location map, sampling site map of soil samples and detailed geological map of the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

Table 1. The chemical compositions of soil samples from the Celak area on southern part of the Bandung, Indonesia.

Sample No.	Au (ppb)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Sample No.	Au (ppb)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
A 1	20	1	29	36	29	F 5	61	2	24	17	65
A 2	4	2	58	14	49	F 6	83	3	56	12	52
A 3	13	0	46	11	42	F 7	5	2	28	21	46
A 4	31	1	29	25	60	F 8	14	2	58	20	47
A 5	5	1	32	11	28	G 1	23	2	53	16	59
A 6	80	2	54	27	52	G 2	58	3	58	24	74
A 7	119	2	53	29	69	G 3	43	2	48	19	80
A 8	41	3	66	67	46	G 4	93	2	43	31	108
B 1	5	1	51	10	57	G 5	103	2	56	29	95
B 2	7	1	51	11	78	G 6	7	2	31	20	44
B 3	4	1	52	9	70	G 7	5	3	55	17	46
B 4	6	2	46	13	46	G 8	5	5	51	33	47
B 5	2	2	52	8	37	H 1	53	2	56	38	123
B 6	45	2	56	22	50	H 2	28	1	68	51	93
B 7	8	11	58	72	62	H 3	83	2	51	41	125
B 8	72	3	55	31	58	H 4	393	2	37	45	53
C 1	11	3	38	14	41	H 5	113	2	53	26	73
C 2	4	1	69	17	77	H 6	31	2	39	42	40
C 3	14	1	58	18	65	H 7	7	2	45	16	58
C 4	9	1	45	14	50	H 8	0	1	43	15	60
C 5	0	1	37	18	40	I 1	1	1	68	15	90
C 6	7	2	51	15	57	I 2	2	2	89	21	48
C 7	6	2	57	19	68	I 3	13	1	71	24	53
C 8	28	1	47	9	24	I 4	275	1	55	57	89
D 1	14	1	51	13	50	I 5	151	2	55	29	87
D 2	24	1	44	15	39	I 6	548	3	37	32	103
D 3	16	1	61	13	58	I 7	13	2	61	28	84
D 4	9	1	68	24	68	I 8	3	2	49	27	94
D 5	48	2	48	16	35	J 1	41	1	54	17	62
D 6	46	2	36	14	40	J 2	4	1	38	11	19
D 7	7	3	46	14	37	J 3	6	1	58	16	34
D 8	13	2	35	10	42	J 4	17	1	36	23	100
E 1	31	2	60	13	50	J 5	13	1	85	29	157
E 2	39	2	62	6	33	J 6	4	1	68	14	109
E 3	13	2	70	19	56	J 7	57	2	43	17	87
E 4	119	1	58	45	56	J 8	22	2	51	16	94
E 5	21	7	29	190	44	K 1	14	1	36	16	66
E 6	47	2	57	32	50	K 2	14	2	41	11	53
E 7	13	2	55	11	37	K 3	25	1	57	20	85
E 8	5	2	70	15	42	K 4	148	2	45	18	46
F 1	45	1	57	15	98	K 5	9	2	63	33	69
F 2	28	2	44	7	50	K 6	7	1	62	14	45
F 3	13	3	56	24	85	K 7	8	1	41	13	46
F 4	30	2	63	17	41	K 8	3	2	47	18	63

mesh 이하로 분쇄하였다. Au, Ag, Cu, Pb와 Zn는 인도네시아 광물자원청이 보유하고 있는 AA와 ICP로 분석을 실시하였다. 토양시료에 대한 분석 결과는 각각 Table 1과 같다.

4. 원소별 분포도

4.1. 은(Ag)

은은 친동원소로서 지각중에 평균 0.05-0.07 ppm,

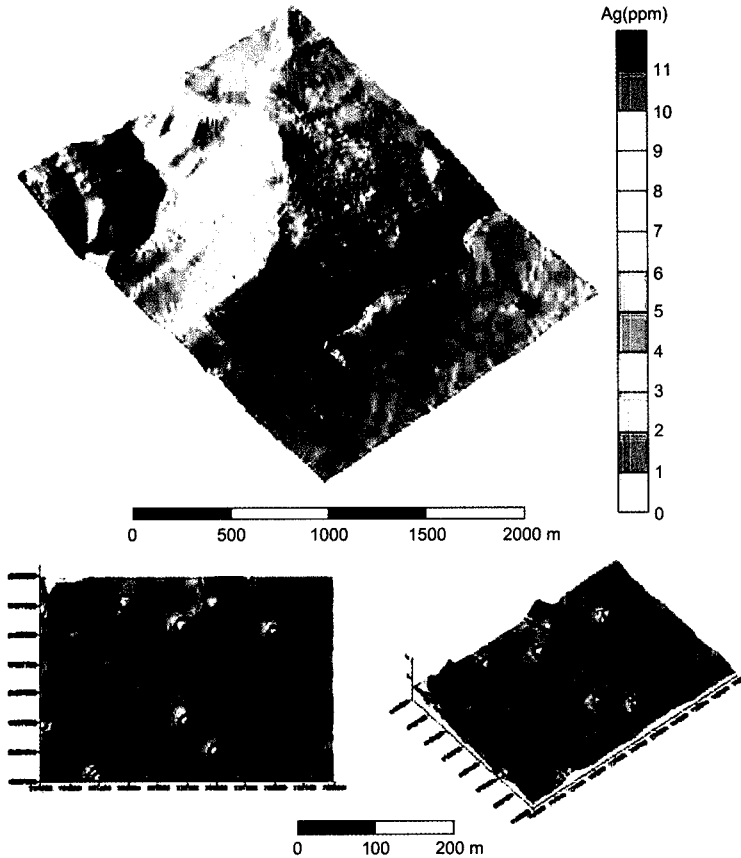


Fig. 2. Silver distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

화강암 0.04 ppm, 현무암 0.1-1.1 ppm, 토양 0.1 ppm, 자연수중에 0.3 ppb가 함유된다(藤森夏樹, 1980; 전효택 등, 1993; Fortescue, 1980). 은은 1가의 나트륨과 알칼리에 치환되는 관계로 알칼리암에 부화되는 경향이 있으며 납, 코발트, 비소, 비스무스 등의 황화물에 잘 수반된다. 또한 Cl^- 이 풍부한 수용액 내에서 Ag^+ 이온은 Cl^- 이온과 잘 수반되며 퇴적물내의 은의 함량은 유기물질의 함량과 산성도 또는 기원물질에 좌우되기도 한다.

이 지역에서 토양 내의 은 함량은 최대 11 ppm(평균함량 : 1.91 ppm)으로 지역 전체에서 대체로 높은 편이나 지역의 서북부와 중북부지역에서 특히 높게 나타난다(Fig. 2).

4.2. 금(Au)

우주내의 금 함량은 은과 비슷하지만 지구의 지각내에는 은의 약 1/20 정도 함유되어 있다. 금은 친동원소이지만 은에 비해 친석원소의 성질을 더 가지며, 친철

원소로서 지각중에 평균 4-12 ppb, 화강암중에 4-8 ppb, 현무암중에 4-36 ppb가 함유된다(藤森夏樹, 1980; 전효택 등, 1993; Fortescue, 1980). 따라서, 맨틀보다는 지각에 더 많이 부화되어 있는 것으로 추정된다. 화성암의 정상적인 분화작용시에는 분화가 진행되면 감소하나 분화말기에는 열수용액내에 전이원소인 니켈, 백금과 비슷하게 금의 함량이 증가한다. 또한 은, 비소, 구리 및 황화물등과 수반되며 원소의 이동성은 거의 없다. 또한 금은 염기성암의 분결 황화광물과 열수광맥내에 미량 존재하며, 동과 은을 포함하는 황화광물의 맥내에 자연금 또는 안티모니 내지 텔루늄화합물로 은, 동 및 수은과 함께 존재한다. 친수원소로 분류될 수 있을 정도로 금의 황화착염은 지각내에 존재하는 수용액에 의해 쉽게 용해되는 성질을 가지고 있다. 이러한 성질이 열수용액에 의해 쉽게 이동하고 지각의 어느 특정한 장소에 농집되어 광상을 형성하기도 하며 세일내의 점토에 흡착되기도 하여 농축되기도 한다.

이 지역에서 토양내의 금 함량은 최대 548 ppb(평균

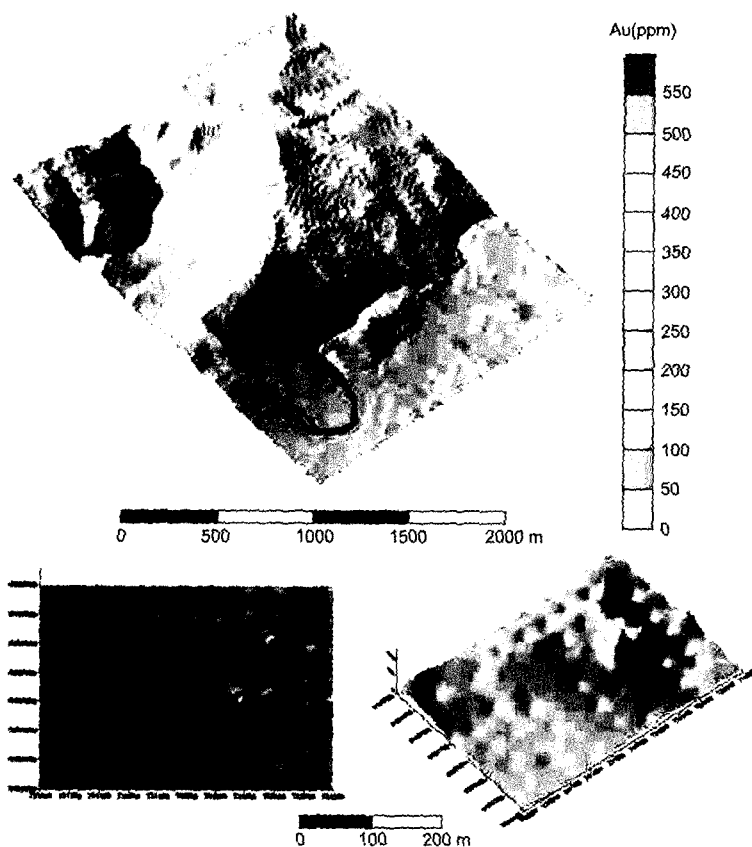


Fig. 3. Gold distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

함량 : 42.36 ppb)으로 전반적으로 높게 나타나고 있다. 특히 지역의 중동부에서 북동부에 걸쳐 200 ppb 이상으로 매우 높게 나타나고 있다(Fig. 3). 이와 같이 전반적으로 금 함량이 높게 나타나는 것은 그 지역에 함금 석영맥이 전체에 걸쳐 분포되고 있어 높게 나타난 것으로 생각된다.

4.3. 구리(Cu)

마그마가 진화하는 동안 전하가 낮은 1가의 동 이온은 초기분화물에 농집되며, 황과 산소의 활동도에 따라 황화광물 내지 산화광물에 분배된다(Curtis, 1964; Helgeson, 1969). 광물내의 구리의 평균함량은 감람석 115 ppm, 휘석 120 ppm, 각섬석 78 ppm, 흑운모 86 ppm, 사장석 62 ppm 등이다(Ure and Berrow, 1982). 황동석은 동의 주광물이며, 현무암 등 염기성 내지 초염기성 화성암이 증성이나 확장암 등의 산성암보다 동 함량이 높다(Wedepohl, 1978). 구리는 저변성작용하에서는 고변성작용보다 이동도가 높고 재분포가 일어난다(Nicollet and Andriambololona, 1980). 구리는 염기

성광물이 많은 퇴적암에서는 비교적 높은 함량을 보이고, 2차 철과 망간 산화물, 점토, 유기물의 함량과 관계가 있다(Forbes *et al.*, 1976; Heydemann, 1959; Steven-son and Ardakani, 1972). 또한 세립인 퇴적암이 장석석영 및 순수 탄산염으로 구성된 퇴적암보다 구리의 함량이 높은 경향을 보인다.

표사내의 구리 함량은 쇄설성 규산염 광물과 산화광물에 좌우되지만 주로 황화광물 특히 황동광의 유무에 관계된다. pH 5.0 이하의 산성환경 하에서는 이들 광물로부터 2가의 구리가 빠르게 유리되지만 유기산, 유기물, 점토광물, 수산화물 및 용해 탄산염 등에 의해 착염화, 공침, 흡착 등을 일으키는 것에 의해 확산이 지배된다. 유기물에 대한 구리의 친화력으로 인해 조류가 풍부하거나 탄질 수계내에서 광물과 관련이 없는 다량의 구리 함량이 확인된다(Rashid, 1974; Rippey, 1982). 수산화철과 망간을 함유하는 퇴적물이 있는 하천에서는 공침보다는 흡착에 의해 수층의 구리 함량이 감소한다(Robinson, 1981). 그러나 방해석이 침전하는 알카리 환경하에서는 공침에 의해 구리와 아연이 빠르

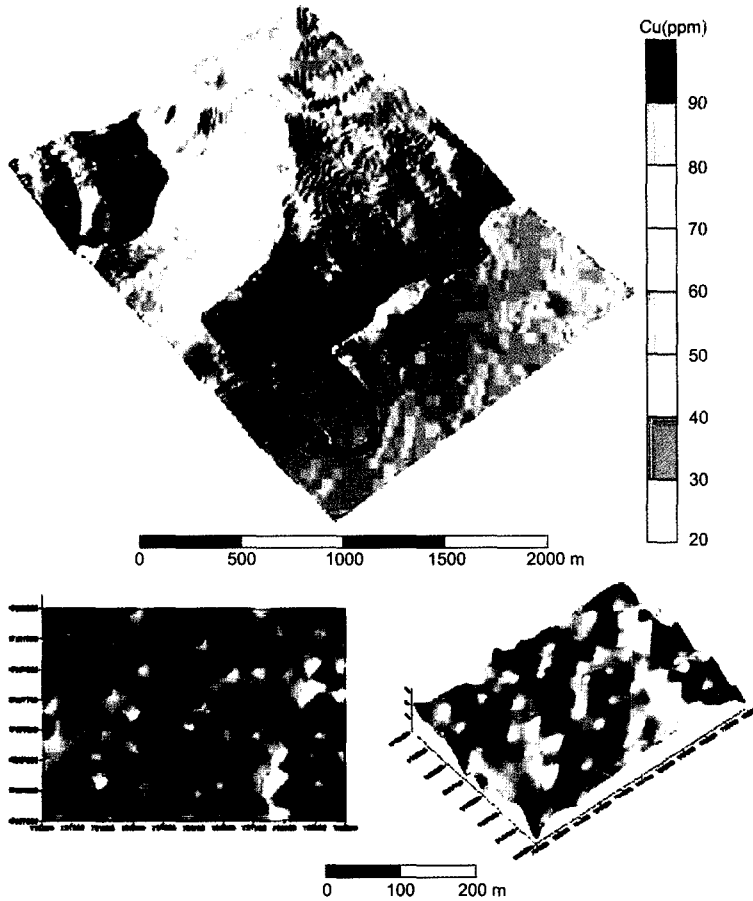


Fig. 4. Copper distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

계 감소한다. 유기물이 많은 퇴적물의 쇄설광물에서 유리된 구리 이온이 혐기성 지표환경하에서 축적작용에 의한 반동석(covellite)이 생성되고 있는 것이 확인되었다(Carignan and Nriagu, 1985). 또한 구리는 친동원소로 지각중에 평균 50-70 ppm, 화강암 10 ppm, 현무암 87-100 ppm, 퇴적암(사암) 10 ppm, 토양 20 ppm, 자연수중에 11 ppb가 함유된다(藤森夏樹, 1980; 전효택외, 1993; Fortescue, 1980). 구리는 Fe, Zn, Pb, As등과 공존하며 원소의 이동성은 낮으며 황화물과 공존한다.

이 지역에서 시료 내에 함유된 구리의 함량은 최대 89 ppm(평균함량 : 51.40 ppm)으로 이 역시 지역 전반에 걸쳐 조금 높게 나타나고 있다. 구리의 분포는 지역의 동중부에서 동남부에 강하게 나타나나 함량은 대체로 30-60 ppm으로서 토양 중의 평균치보다 조금 높은 편이다(Fig. 4). 따라서 이는 동광화작용은 없었던 것으로 사료되며 단지 암석내의 일반적인 구리를 함유한 광물에 의한 것으로 생각된다.

4.4. 납(Pb)

2가 Pb이온의 반경은 K와 Ca이온의 중간크기이므로 이들 이온을 가지는 카리장석, 운모류, 사장석 및 인회석에 치환상태로 부존하며, 혐기성 화성암보다는 산성 화성암에 부화된다. 납은 후기 마그마 분화단계에 이동성이 크며(MacDonald *et al.*, 1973), 친동원소의 성질을 가지고 있다. 저변성작용시와 granulite상의 변성시에 감소하는 경향이 있다(Gebauer and Grunefelder, 1977; Sighionfi and Gorgoni, 1978). 퇴적암내의 Pb분포는 장석, 운모, 황화광물 등의 쇄설 광물, 점토광물과 유기물의 함량과 관계가 있다(Heinrichs, 1974). 따라서 순수 석회암과 사암내에는 세일보다 상대적으로 납의 함량이 낮다. 퇴적암중 흑색셰일에서 높은 납 함량을 보이는데 이는 납이 유기물과 친화적임을 나타낸다. 표사에서 납은 장석, 운모, 사장석 및 Fe-Mg 규산염 광물내에 부존하며, 열수광상지역에서는 방연석으로 부존된다. pH가 높은 경우, 용해된 음이온

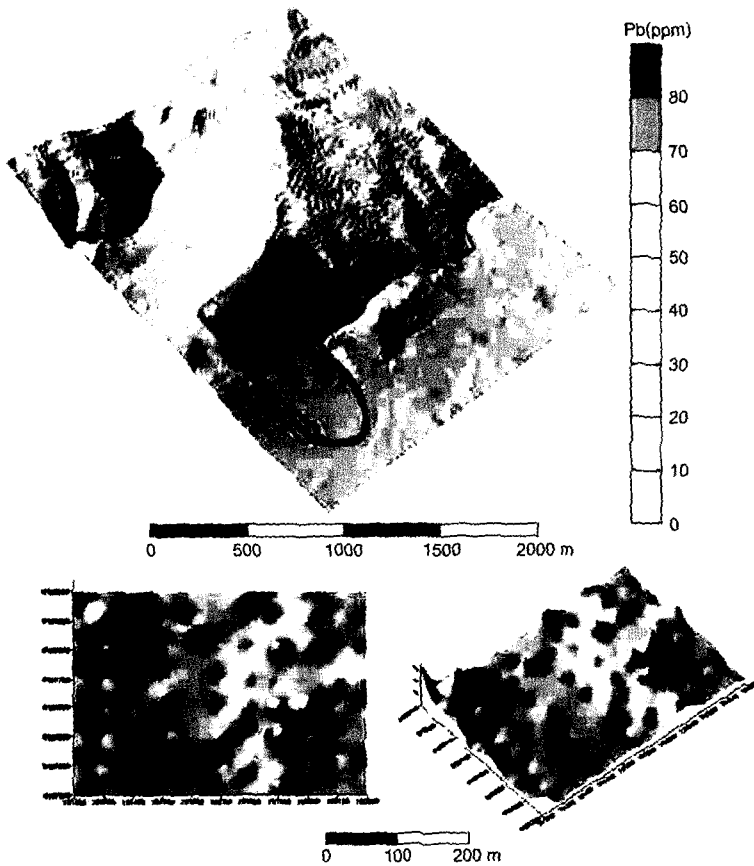


Fig. 5. Lead distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

들의 표면보호에 의해 방연석의 용해가 낮지만 화강암 지역이나 탄질 하천인 산성하천에서는 방연석은 쉽게 용해되어 수산화철과 망간에 흡착된다. 또한 납은 친동원소로서 지각중에 평균 10-16 ppm, 화강암 19-20 ppm, 현무암 5-6 ppm, 퇴적암(사암) 7 ppm, 토양 17 ppm, 자연수중에 5 ppb가 함유된다. 또한 납은 Ag와 같은 귀금속과 친화하고 황화광물의 Fe, Zn, Cu, Sb와도 공존하며 원소의 이동성은 비교적 낮다.

시료 내에 함유된 납의 함량은 최대 190 ppm(평균 함량 : 23.69 ppm)으로 이역 시 지역 전반에 걸쳐서 높게 나타나고 있다(Fig. 5). 시료 내에 함유된 납의 분포는 조사지역의 동북부와 지역의 동부 지역에서 높게 나타난다.

4.5. 아연(Zn)

마그마 진화과정중 모든 전이원소와 마찬가지로 초기분별결정에 참여하는 조화원소로 산성암 보다 염기성 암석에 더 많이 부화된다(Wedepohl, 1978). 이는

반경이 비슷한 철과 마그네슘이온을 쉽게 치환하여 산화 및 규산염광물에 분배된다. 염기성암에서는 자철석이, 산성암에서는 흑운모가 아연함량에 중요한 역할을 하며(Ure and Berrow, 1982), 이들 두 광물이 공존할 경우에는 흑운모에 더 많은 양이 농집되는 성질이 있다. 크롬 스피넬내에 많은 양의 아연이 확인되는 것으로 보아 층상의 초염기성암에 높은 함량이 있는 것으로 추정된다(Carter, 1970). 화성암과 황화광상내에 들어 있는 섬아연광(ZnS)이 대표적인 광물이며 이는 아연이 친동원소임을 지시한다. 저변성작용하에서는 아연의 이동도는 낮지만(Condie, 1976; Nicollet and Andriam-bololona, 1980), 변성도가 높아져 graulite 상의 변성작용시에는 이동도가 증가하여 결핍현상을 일으킨다(Sighinolfi and Gorgoni, 1978; Engel and Engel, 1960). 퇴적암내의 아연분포는 대부분 쇄설 철 마그네슘 규산염광물, 자철석 및 점토광물의 양에 좌우된다(Wedepohl, 1978). 아연은 산화철에 쉽게 흡착되므로 철의 양과 비례한다(Knezek and Ellis,

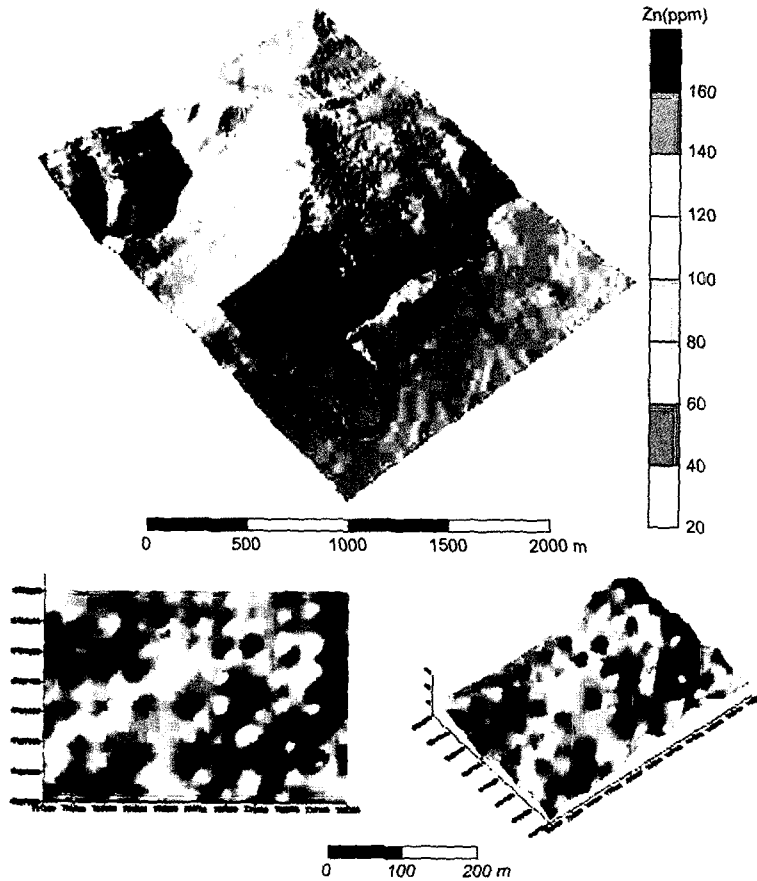


Fig. 6. Zinc distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

1980). 석회암, 석영-장석질 사암은 그레이왁이나 셰일에 비해 낮은 아연의 함량을 보이며, 유기물과 친화성이 있으므로 오일셰일에서 높은 함량을 보이고 (Wedepohl, 1978), 울리틱 철광상이나 철망간 노듈에서도 높은 함량을 가지고 있는 것이 확인되었다 (Jenkyns, 1977). 표사내의 아연은 쇠철 산화광물과 철마그네슘 규산염 광물내에 존재하며, 이들 광물은 대부분의 환경하에서 서서히 풍화된다. 산성환경의 하천수에서는 황화광물의 용해와 금속원소의 활성화로 아연의 확산은 빠르게 일어난다. 산화환경하에서 황화광물의 풍화작용은 용해 Cd 황산염과 탄산염의 농도를 높게 만든다.

이 지역에서 시료 내에 함유된 아연의 함량은 최대 157 ppm (평균함량 : 61.78 ppm)으로 이역 시 지역 전반에 걸쳐서 높게 나타나고 있다(Fig. 6). 조사지역의 시료 내에 함유된 아연의 분포는 지역의 동부에 높게 나타난다.

5. 통계 분석

단일변수 통계와 다변수 통계분석을 통하여 분석된 토양시료들의 성분들 간의 상호관계를 파악하였다. 원소들의 함량과 이러한 통계분석 결과를 2차원으로 분포도를 작성하였다. 단일변수 통계에서는 조사지역내 분석값들의 평균값, 표준편차, 상관계수, 평균값+2σ(이상대), 이상대를 설정하기 위한 기준으로 상위 5% 경계값들을 구하였으며 다변수 통계에서는 시료들의 분석원소들간의 상호관계 및 시료들간의 상호관계를 파악하기 위한 요인분석을 실시하였다.

5.1. 기본통계분석

각 원소에 대한 지각, 화강암, 토양 등에 대한 평균 함량이 각 문헌의 자료들(藤森夏樹, 1980; 전효택 등, 1993; Fortescue, 1980)마다 약간의 차이를 보여 최소와 최대의 범위를 나타내었다. 그러나 분석치에서 대

부분의 원소의 경우 최대치와 최소치의 차이가 크고 분석치가 한쪽으로 치우치는 경우가 많아서 분석치의 신뢰도를 높이기 위하여 수방산 지역(토양지화학시료)에서(Fig. 2) 채취한 시료들에 대한 5개 원소의 분석치를 통계처리 하여 표준편차(2σ)와 한계치(threshold)를 구하여 토양시료에 대하여 Table 2에 나타내었다. 이 표에는 각 지역에 대한 원소함량의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차, 최대한계값(threshold)등이 나타나 있다.

수방산 지역에서의 토양시료들의 각 원소에 대한 평균값을 보면 Ag은 1.91 ppm, Au은 42.36 ppb, Cu은 51.40 ppm, Pb은 23.69 ppm, Zn은 61.78 ppm이다. 모든 원소들의 평균함량이 화성암과 토양의 평균함량보다 조사지역이 높다. 대다수의 원소들의 평균함량이 화성암과 토양의 평균함량보다 조사지역의 토양에서 높다는 것은 조사지역에 광화작용의 가능성이 더 높다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

원소들간의 상관관계값 역시 토양에 대하여는 Table 3에 제시하였다. 이들의 관계를 보면 수방산 지역의 토

양에서는 금-연이 0.5이상의 좋은 상관관계를 보이며 나머지 원소들의 상관관계는 좋지 않다.

5.2. 요인분석

분석된 원소들간, 또한 시료들 사이의 관계를 파악하여 광물이 부존가능 유망지역을 선정하기 위해 요인 분석을 실시하였다. 요인분석시 적절한 요인적재값의 추출을 위해 eigenvalue가 1 이상인 값을 선택하였으며 Varimax 회전법을 이용하였다. eigenvalue가 1 이상인 factor 수는 조사지역에서 토양시료는 3개이다. Table 4에 토양시료에 대한 요인적재값(factor loading)을 제시하였다. 토양에 있어서 원소들간의 관계를 보여주는 factor는 다음과 같다.

Factor 1(Fig. 7)은 Ag와 Pb에 관계하며 전반적으로 높은 값을 보이지만 이상대는 지역의 북서부에 나타나며, 이 이상대는 귀금속 광화작용의 가능성이 있음을 지시한다.

Factor 2(Fig. 8)는 Cu와 Zn에 관계하며, 전반적으로 높은 값을 보이지만 지역의 중앙부에서 중남동부 걸쳐서 나타난다. 이 이상대 역시 귀금속 광화작용의 가능성이 있음을 지시한다.

Factor 3(Fig. 9)는 Au와 Zn에 관계하며, 역시 전반적으로 높은 값을 보이지 지역의 중부에서 중동부 주

Table 2. The statistical values of soils from study area on southern part of the Bandung, Indonesia.

	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Threshold (m+2σ)
Ag	1.91	1.35	0	11	3.26
Au	42.36	79.27	0	548	121.63
Cu	51.40	12.29	24	89	63.69
Pb	23.69	21.84	6	190	45.53
Zn	61.78	24.87	19	157	86.62

Table 3. The correlation coefficients of soils from study area on southern part of the Bandung, Indonesia.

	Ag	Au	Cu	Pb	Zn
Au	1.000				
Ag	0.057	1.000			
Cu	-0.150	-0.050	1.000		
Pb	0.191	0.568	-0.079	1.000	
Zn	0.237	-0.063	0.294	0.114	1.000

Table 4. Before and after factor loadings of soils from study area on southern part of the Bandung, Indonesia.

	Before Rotation			After Rotation		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
eigen value	1.651	1.325	1.080	1.568	1.281	1.207
Ag	0.803	-0.173	0.378	0.889	-0.056	-0.081
Au	0.424	0.311	-0.745	0.083	-0.079	0.905
Cu	-0.203	0.664	-0.585	-0.034	0.867	-0.270
Pb	0.875	0.025	0.168	0.867	0.024	0.203
Zn	0.138	0.870	-0.110	0.002	0.721	0.517

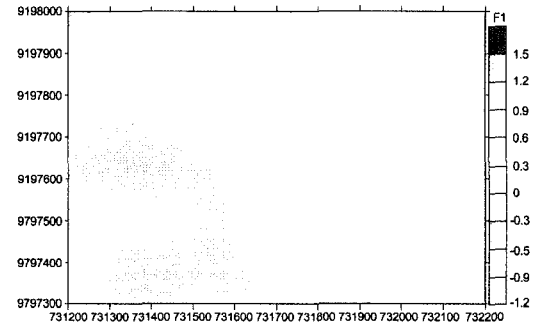


Fig. 7. Factor 1 distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

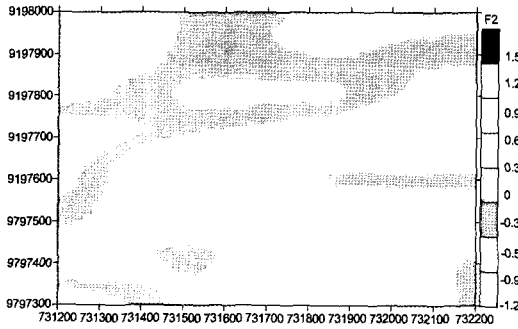


Fig. 8. Factor 2 distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

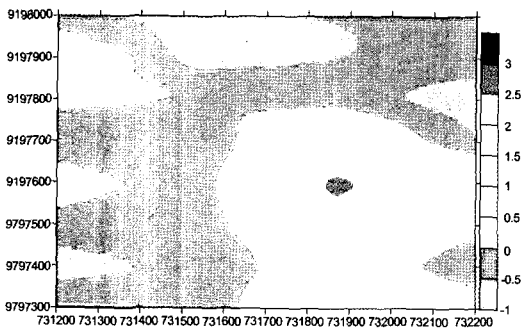


Fig. 9. Factor 3 distribution map of soil samples from the Mt. Subang area on southern part of the Bandung, Indonesia.

위에 분포한다. 이 이상대는 금광화작용의 가능성이 있는 지역으로 사료된다.

6. 이상대

조사지역은 사암, 이암, 석회암 및 화산성 사암 등을 포함하는 퇴적암류, 안산암과 응회암 등 주로 퇴적암

과 화산암으로 구성되어 있다.

채취된 토양시료들은 이들 각 암층들이 바로 풍화되어 그 자리에 퇴적되었다고만 보기 어려우므로 지화학 성분들의 배경값을 정의하기가 매우 어렵다. 따라서 이런 경우에는 시료채취 지점근처의 암석들의 배경값을 최대배경값(threshold) 설정에 이용할 수 없다. 그러므로 각각의 이상대의 최대배경값을 설정하는 기준은 토양시료의 금속원소의 평균값과 이상값 사이를 상대 비교하여 적용하였다. 평균값 + 2x 표준편차(x+2σ) 값 이상을 보이는 값을 이상대라 정의하였다. 조사지역의 시료들의 원소분포를 보면 거의 정상분포 분포를 나타낸다. Table 2에 토양의 이상대의 최대배경값을 제시하였다. 통계학적으로 x+2σ 값은 자료집단이 정상분포를 이룬다고 가정할 경우 여기에서는 이상대 값을 해석하는데 있어 가장 중요한 요인으로 택하였다.

Fig. 10은 조사지역의 이상대를 나타낸 그림이다. Ag, Au, Cu, Pb 및 Zn의 이상대들은 조사지역내에서 분산되어 나타난다.

Ag의 토양 이상대는 지역 내에 북서부에 나타난다. Ag 이상대 토양의 최대배경값은 3.26 ppm(g/t)이며 이의 평균함량은 1.91 ppm을 보이며, 화성암에서의 평균 함량 0.5 ppm의 약 4배 높게 나타난다. Au의 토양 이상대는 지역의 중동부에 나타난다. Au의 토양의 이상대 최대배경값은 121.63 ppb(0.01 g/t)이며 이의 평균함량은 42.36 ppb를 보이며, 화성암에서의 평균 함량 4 ppb의 약 10배로 매우 높게 나온다. Cu의 토양 이상대는 지역 내에 분산되어 분포한다. Cu의 토양 이상대 최대배경값은 63.69 ppm이며 이의 평균함량은 51.40 ppm을 보이며, 화성암에서의 평균 함량 60 ppm 보다 약간 높게 나타나므로 동의 이상대는 별 의미가 없다

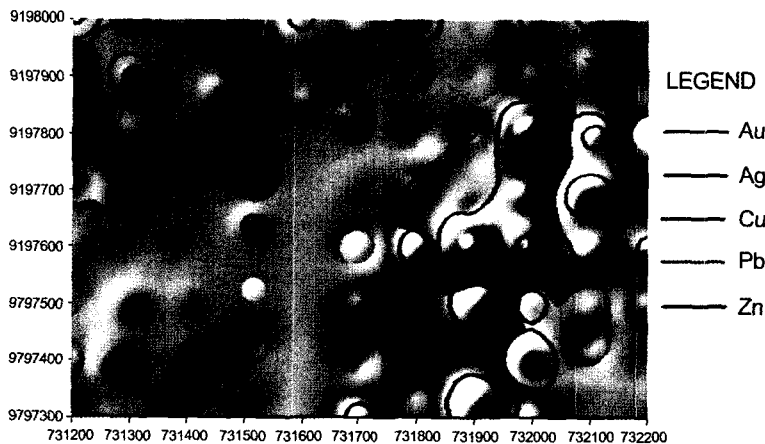


Fig. 10. Anomalies of soils from study area on southern part of the Bandung, Indonesia.

고 할 수 있다. Pb의 토양 이상대는 지역의 북서부에 나타나며 이는 은의 이상대와 일치하고 있으며 이는 factor 1(Fig. 9)과 잘 일치한다. Pb 이상대 토양의 최대배경값은 45.53 ppm이며 이의 평균함량은 23.69 ppm을 보이며, 화성암에서의 평균 함량 15 ppm의 약 2배로 나타난다. Zn의 토양 이상대는 지역의 분산되나 주로 중동부에 나타난다. Zn의 이상대 토양의 최대배경값은 86.62 ppm이며 이의 평균함량은 61.78 ppm을 보이며, 화성암에서의 평균 함량 70 ppm보다 약간 낮게 나타나므로 아연의 이상대는 별 의미가 없다고 할 수 있다.

지화학자료처리 결과, 연구지역의 북서부와 중동부 지역이 금은 지화학이상대가 확인되었으며, 이 이상대는 금번 정밀토양지화학탐사와 지질조사 등을 통해 탐사된 독립된 여러 이상대 중 시추탐사와 아울러 보다 더 정밀한 조사를 할 필요가 있으며, 또한 석영맥이 발달하는 수방산근처의 남부 지역(정밀토양지화학탐사 지역내의 북서부)에 대하여 우선적으로 시추탐사가 이루어져야 할 것이다.

7. 결 론

조사지역인 인도네시아 반둥 남부의 땅금지역에 분포되는 토양을 대상으로 정밀토양지화학탐사를 실시하여 이들에 대한 화학분석치 결과를 통계처리 하여 각 원소별로 이상대지역을 정하였으며, 또한 정밀지표지질 조사를 실시하였다. 이 지역에서 채취한 토양시료의 화학분석 값은 Ag: 11 ppm(평균함량 : 1.91 ppm), Au: 548 ppb(평균함량 : 42.39 ppb), Cu: 89 ppm(평균함량 : 51.40 ppm), Pb: 190 ppm(평균함량 : 23.69 ppm), Zn: 157 ppm(평균함량 : 61.78 ppm)이다. 정밀토양지화학탐사를 실시하여 이들에 대한 화학분석치 결과와 통계처리를 한 결과, 지역의 중동부지역이 다원소 지화학이상대가 확인되었으며, 이 이상대는 금번 광역지화학탐사와 지질조사 등을 통해 탐사된 독립된 여러 이상대에 대해 정밀조사를 할 필요가 있으며, 또한 석영맥이 발달하는 수방산근처에 대하여 우선적으로 정밀조사가 이루어져야 할 것이다.

사 사

이번 연구는 당 연구원이 인도네시아 반둥 남부지역에 대하여 2003년 산업자원부 출연 연구과제인 “인도네시아 반둥 남부지역의 지질조사” 사업의 지원을 받

아 수행한 연구 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 藤森夏樹. (1980). 환경의 지구화학 개론. 현대공학사, 223p.
전효택, 김종대, 김옥배, 민경원, 박영석, 윤정환. (1993). 응용지구화학. 서울대학교 출판부, 380p.
- Carignan, R. and Nriagu, J. O. (1985) Trace metal deposition and mobility in the sediments of two lakes near Sudbury, Ontario. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 49, p. 1753-1764.
- Carter, J. L. (1970) Mineralogy and chemistry of the earth's upper mantle based on the partial fusion-partial crystallisation model. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 81, p. 2021.
- Condie, K. C. (1976) Trace element geochemistry of Archean Greenstone Belts. *Earth-Science Reviews*, v. 12, p. 393-417.
- Curtis, C. D. (1964) Applications of the crystal-field theory to the inclusion of trace transition elements in minerals during magmatic differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 28, p. 389-403.
- Engel, A. E. J. and Engel, C. G. (1960) Migration of elements during metamorphism in the Northwest Adirondack Mountains, New York. U.S. Geological Survey Professional Paper, No. 400-B, 465p.
- Forbes, E. A., Posner, A. M. and Quick, J. P. (1976) The specific adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Pb, Zn on goethite. *Journal of Soil Science*, v. 27, p. 154-165.
- Fortescue, J. A. C. (1980) *Environmental geochemistry*, Springer-Verlag, 347p.
- Gebauer, D. and Grunenfelder, M. (1977) U-Pb systematics of detrital zircons from some unmetamorphosed to slightly metamorphosed sediments of Central Europe-Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 65, p. 29-38.
- Heinrichs, H. (1974) Die Untersuchung von Gesteinen und Gewässern auf Cd, Sb, Hg, Pb, Bi mit der flammenlosen Atomabsorption. Unpublished Ph D thesis, University of Göttingen, 187p.
- Helgeson, H. C. (1969) Thermodynamics and hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, v. 267, p. 729-804.
- Heydemann, A. (1959) Adsorption aus sehr verdünnten kupferlösungen an reinen tonmineral. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 15, p. 305-329.
- Jenkyns, H. C. (1977) Fossil manganese nodules. In *Marine manganese deposits*. Glasby, G P (editor). Amsterdam: Elsevier Oceanography Series, 183p.
- Knezek, B. D. and Ellis, B. G. (1980) Essential nutrients. IV:copper, iron, manganese and zinc. In *Applied soil trace elements*. Davies, B. E. (editor). Chichester: John Wiley and Sons. p. 259-286.
- MacDonald, R., Upton, B. G. T. and Thomas, J. E. (1973) Potassium and fluorine-rich hydrous phase co-existing with peralkaline granite in South Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 18, p. 217-222.
- Nicollet, C. and Adriambololona, D. R. (1980) Distribu-

- tion of transition metals in crustal metabasic igneous rocks. *Chemical Geology*, v. 28, p.78-90.
- Rashid, M. A. (1974) Adsorption of metals on sedimentary and peat humic acids. *Chemical Geology*, v. 13, p. 115-123.
- Riphey, B. (1982) Sediment-water interactions of Cu, Zn and Pb discharged from a domestic waste water source into a bay of Lough Neagh, Northern Ireland. *Environmental Pollution(B)*, v. 3, p. 199-214.
- Robinson, G. E. (1981) Adsorption of Cu, Zn and Pb near sulfide deposits by hydrous manganese-iron oxide coatings on stream alluvium. *Chemical Geology*, v. 33, p. 65-79.
- Sighinolfi, G. P. and Gorgoni, C. (1978) Chemical evolution of high-grade metamorphic rocks-anatexis and remobilisation of material from granulite terrains. *Chemical Geology*, v. 22, p.157-176.
- Stevenson, F. J. and Ardakani, M. S. (1972) In *Micro-nutrients in agriculture*. Mortveldt, J. J, Giordano, P M and Lindsay, W L (editors). Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. Inc., p. 79-104.
- Ure, A. M. and Berrow, M. L. (1982) The elemental constituents of soils, *Environmental chemistry* v. 2, p. 94-201
- Wedepohl, K. H. (1978) *Handbook of Geochemistry*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 156p.

2004년 1월 19일 원고접수, 2004년 4월 1일 게재승인.