

变性土铁锰氧化物结核与钙质结核的元素富集及其环境意义

刘良梧 张民

(中国科学院南京土壤研究所)

暖温带变性土中的铁锰氧化物结核(铁锰结核)既可出现在黑土层中,也可出现在钙质结核黄土层中,甚或与钙质结核相伴生。铁锰氧化物结核是土壤氧化还原过程的产物。因此,它的分布与形成可反映土壤地球化学环境和成土过程特点。

铁锰氧化物或氢氧化物的相应矿物对常常为等结构。它们在晶体化学上的相似性决定了这两类矿物常以不同比例共生在一起,但铁和锰元素在地球化学特性上又有所分异。这种既共生又有分异的特点造成了结核成分的多变性。为了确切表述各成分的相对百分数含量,以阐明它的表生地球化学特征,笔者沿用四分法原则将其分为4类:铁结核(铁氧化物含量在75—100%,锰氧化物含量在25—0%之间);锰结核(锰氧化物含量在75—100%,铁氧化物含量为25—0%);铁锰结核和锰铁结核。后二者的铁锰氧化物含量介于前两类之间。从我们所研究的样品来看,暖温带变性土中有4个样品属铁结核,其 Fe_2O_3 量分别占铁锰氧化物总量的78.5%,79.3%,80.2%和81.4%,有5个样品属铁锰结核, Fe_2O_3 含量在65.2—71.0%之间。迄今,在暖温带变性土中尚未发现锰结核和锰铁结核。

(一)铁锰氧化物结核的矿质元素特征

铁结核及铁锰结核的化学组成均以 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 为主(表1)。由于结核中存在大量的石英,因而 SiO_2 含量较高。结核中有少量长石和粘土矿物存在,故而含有一定量的 Al_2O_3 。穆斯堡尔谱表明,结核中的铁矿物主要为针铁矿,以及少量的赤铁矿和包膜三价铁,表明铁锰氧化物结核是在水化程度较高的氧化还原环境中形成的。

表1结果还表明,两个类型铁锰氧化物结核的矿质元素含量有所不同。其中铁结核的Si、Al、Mn元素量比铁锰结核分别少11.09%、1.73%和1.76%,而Fe元素含量却比后者高8.5%左右。由于铁结核中铁多锰少,故而Fe/Mn比大于铁锰结核,前者为3.53,而后者仅有1.91。尽管铁结核和铁锰结核的矿质元素含量有异,但各成分的平均含量的顺序均为 $\text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Ti} > \text{P}$ 。

有趣的是,铁结核粒径大小的变化在化学组成上亦有相应的反映。由表2可见,在铁结核粒径由1—2mm增加到5—7mm时,锰含量由3.82%迅速增加到8.14%,而铁含量则由27.86%急剧减至19.61。这说明在铁结核生长过程中,锰的地球化学行为比铁更活泼。鉴于二价锰的迁移能力大于铁,且以较快的氧化速度沉淀下来,从而造成随着结核的增大,铁锰之比由7.29减少到2.42。与此同时,硅的增加可能是因为随着结核的逐渐增大,包裹的土壤基质

* 国家自然科学基金资助项目。

渐增之故。另外, Si 与 Fe 的负电性比 Si 与 Al 的负电性更接近, 当铁在温湿条件下以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体迁移沉淀过程中往往与 Al_2O_3 胶体相结合, 导致硅含量的增加, 但增长速度较慢。

表 1 铁锰氧化物结核及其相应土壤的化学组成

结核类型及其相应的土壤	样品数	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
铁结核	4	32.32 ±1.21	26.78 ±5.55	10.82 ±0.76	6.14 ±5.38	0.97 ±0.18	0.40 ±0.03	6.90 ±1.22	1.09 ±0.19	0.58 ±0.11	0.19 ±0.04
铁结核层土壤	3	61.06 ±3.66	7.41 ±3.94	14.87 ±1.56	2.90 ±1.85	2.41 ±0.62	0.62 ±0.04	0.20 ±0.08	1.90 ±0.31	1.26 ±0.19	0.09 ±0.03
铁锰结核	5	43.61 ±4.93	18.22 ±1.55	12.55 ±1.01	3.56 ±3.79	1.30 ±0.18	0.51 ±0.05	8.66 ±0.88	1.40 ±0.15	0.79 ±0.10	0.14 ±0.01
铁锰结核层土壤	5	66.25 ±4.30	5.22 ±1.19	13.86 ±0.98	2.47 ±1.09	2.08 ±0.46	0.64 ±0.06	0.16 ±0.19	1.95 ±0.23	1.41 ±0.16	0.10 ±0.01

(二) 铁锰氧化物结核中各种铁锰形态的含量

如前所述, 铁结核中的全铁含量高于铁锰结核, 而全锰含量低于铁锰结核。分析结果表明, 结核中的铁和锰以游离态为主, 其铁和锰的游离度分别达到 76.2—80.1% 和 86.0—93.0%, 而游离态铁、锰中又以晶质铁和晶质锰为主, 无定形铁和无定形锰为辅。这从它们的活化度里已充分反映出来(表 3)。对比两个类型结核的差别则发现, 铁结核的铁、锰游离度均大于铁锰结核, 而活化度则均小于铁锰结核。这表明铁结核形成时的氧化还原强度大于铁锰结核。而锰的游离度明显高于铁的游离度, 反映了锰比铁更为活泼。同时表明了土壤的 pH 和 Eh, 以及水热条件对锰氧化物溶解度的影响比铁氧化物要小得多。

(三) 铁锰氧化物结核的微量元素丰度特征

铁锰氧化物结核中的微量元素含量除 Zn 和 Cr 接近或低于地壳元素克拉克值以外, 其余 7 种元素的丰度均超过, 或大大超过克拉克值。其中以 Ba 最高(大于 7000mg/kg), 其后依次为 V(大于 650mg/kg)、Ni、Co、Sr、Pb 和 Cu 等元素。值得注意的另一个特征是, 铁锰氧化物结核的微量元素丰度集中在一定范围内, 不象钙质结核那样个体含量之间变化幅度较大。从统计中得知, 两种结核的微量元素丰度序列基本相同, 且各元素的含量范围基本在误差范围之内。因此, 铁锰氧化物结核是一个富含多种微量元素的均匀体(表 4)。

表 2 铁结核粒径与元素含量之间的关系

结核粒径 (mm)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Fe/Mn
<2	14.09	27.86	3.82	7.29
2-3	15.36	25.54	4.36	5.86
3-5	15.70	21.08	7.14	2.95
5-7	15.78	19.61	8.12	2.42

表 3 铁锰氧化物结核中铁锰形态的含量(占烘干重%)

结核类型	全铁	游离铁	无定形铁	游离度(Fe)	活化度(Fe)	全锰	游离锰	无定形锰	游离度(Mn)	活化度(Mn)
铁结核(n=2)	24.65	19.75	2.49	80.1	12.6	6.56	6.10	1.78	93.0	29.2
铁锰结核(n=5)	18.22	13.89	2.72	76.2	19.6	8.66	7.45	2.54	86.0	34.1

(四)铁锰氧化物结核的富集率

正如表 1 所示,铁锰氧化物结核中富集有大量的铁和锰,尤以锰最为突出。与相应土壤对比,结核中铁的含量高于相应土体 3 倍多,而锰的含量则是土体的 34—54 倍。其中铁锰结核里锰的富集最为惊人。两种结核富集程度的差异与它们的形成环境有关。众所周知,亚铁比亚锰易氧化,而高价氧化锰比氧化铁更易还原。在缓慢氧化条件下,铁较锰先氧化沉淀形成铁结核。在迅速氧化环境中,铁锰同时沉淀则易形成铁锰结核。钙的富集表明,在 pH 较高的环境下,碳酸钙与铁、锰氧化物胶体同时沉淀。在钙质结核中,通常镶嵌有铁结核或铁锰结核,以及有铁、锰斑就是佐证。总之,Mn、Fe、Ca 和 P4 种元素是上述两种类型结核富集的共同元素,其富集率大于 1.00。而 Mg、Na、Si 和 K 则富集能力相对较弱。

表 4 铁锰氧化物结核及其相应土壤的微量元素丰度(mg/kg)

结核类型及其相应的土壤	样品数	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	Sr	Ba	Pb
铁结核	2	94.6 ±9.1	69.5 ±0.4	282.1 ±12.7	291.5 ±47.0	29.8 ±0.9	671.6 ±89.1	233.3 ±9.0	7069.8 ±866.8	156.7 ±29.1
铁结核层土壤	2	3.7 ±3.7	110.7 ±33.7	23.7 ±11.2	67.4 ±15.2	152.0 ±111.1	160.3 ±29.2	142.4 ±14.7	779.0 ±352.0	27.3 ±7.6
铁锰结核	5	111.5 ±22.9	76.4 ±7.4	448.9 ±106.9	449.0 ±83.1	35.8 ±7.0	658.9 ±111.2	234.4 ±98.7	7485.0 ±568.9	299.4 ±45.8
铁锰结核层土壤	5	7.6 ±10.6	108.9 ±43.6	13.7 ±10.1	40.8 ±18.2	72.8 ±85.8	113.6 ±32.1	128.1 ±71.3	639.4 ±215.6	19.7 ±6.6
克拉克值		70	80	40	100	200	150	150	430	0.01

既然各类型结核的微量元素丰度序列较为一致,而诸元素含量在误差范围之内基本类似,似乎各类型结核之间的富集率序列也应相同。然而,事实并非如此,由于铁结核和铁锰结核相应土壤中的微量元素丰度的差异,故富集率序列仍有所区别,尤其表现在 Cu、Co、Ba 和 Pb4 种元素上(表 5)。

综上所述,铁结核元素富集率序列是:Mn>Cu>Co>Ba>Pb>Ni>V>Fe>Ca>P>Sr|>Al>Ti>Zn>K>Si>Na>Mg>Cr;铁锰结核元素富集序列为:Mn>Co>Pb>Cu>Ba>Ni>V>Fe>Sr>Ca>P>Al|>Ti>K>Zn>Si>Mg>Na>Cr。可见,铁锰氧化物结核富集有 11—12 种元素。其中以铁族元素(5 种)和造岩元素(4—5 种)占主导地位,并兼有 2 种亲铜元素。铁锰氧化物结核个体虽小,但富集元素之多,富集量之大则是变性土中钙质结核所无法比拟的。这也正是变性土形成过程中铁锰氧化物结核不同于钙质结核的重要元素地球化学特征。

表 5 铁锰氧化物结核的元素富集率

结核类型	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	K	Na	P	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	Sr	Ba	Pb
铁结核	0.53	3.61	0.73	2.12	0.40	0.65	34.50	0.57	0.46	2.11	25.57	0.63	11.90	4.33	0.20	4.19	1.57	9.08	5.74
富集率序列:Mn>Cu>Co>Ba>Pb>Ni>V>Fe>Ca>P>Sr >Al>Ti>Zn>K>Si>Na>Mg>Cr																			
铁锰结核	0.66	3.49	0.91	1.44	0.63	0.80	54.13	0.72	0.56	1.40	14.67	0.70	32.77	11.01	0.49	5.80	1.83	11.71	15.20
富集率序列:Mn>Co>Pb>Cu>Ba>Ni>V>Fe>Sr>Ca>P>Al >Ti>K>Zn>Si>Mg>Na>Cr																			

钙质结核,又名碳酸盐结核,或石灰结核。根据它们在变性土中的形态特征、化学性质和发育程度,可划分为锥形钙质结核、完形钙质结核和钙质硬磐三类。本文拟就钙质结核在变性土剖面中的分布,一般土壤学性质和元素地球化学特征作一简略介绍。

(一) 钙质结核在土壤剖面中的分布

钙质结核是我国河湖相沉积物发育的变性土中的一种重要特征。在淮北平原、苏北平原、山东半岛平原和广西右江河谷盆地等河湖相沉积物发育的变性土剖面中大都有钙质结核。它们通常聚集成层,有的剖面中仅见一层,有的则多层分布。

钙质结核在剖面中的分布,浅者 20—40cm,深者 100—200cm。不过,不同类型的钙质结核其分布深度不尽相同。总体说来,锥形钙质结核分布在剖面中上部(约 50—80cm 处);完形钙质结核分布于剖面中下部(70—120cm 处);钙质硬磐则位于剖面下部,甚或超过一般土壤剖面范围,紧邻地下水第一含水层(达 3m 之深)。据野外观察,锥形和完形结核或共存于同一土层中,或同一土层中可出现大小不一,或颜色有异的两种完形钙质结核。

对于黄淮海平原的变性土而言,钙质结核主要集中分布在黑土层下面的黄土层中。而黑土层中往往不出现钙质结核。作者仅发现一个剖面的黑土层中有外表浸染成黑色的、核状的完形钙质结核。至于右江河谷盆地的变性土,钙质结核多位于心土层中。有时变性土地表也具有钙质结核,可能这与小地形的侵蚀切割有一定关系。

尽管变性土中存在三个类型的钙质结核,但以完形钙质结核在剖面中的分布最为普遍,且剖面下部形大量多,而上部形小量少(表 6)。

表 6 钙质结核在土壤剖面中的分布 (kg/m³ 土体)

土壤深度 (cm)	结 核 粒 径 (cm)					结核总重	占土体重量(%)
	10—5	5—3	3—2	2—1	<1		
80—90	0	69.2	80.7	36.5	11.6	198.0	12.4
180—200	51.6	163.7	101.3	184.2	51.7	552.5	34.5

(二) 钙质结核的一般性质

钙质结核中有机碳含量极少,一般为 1.0—1.8g/kg。其中锥形钙质结核的有机碳量略高些,可达 2.1g/kg。这与它含有较多的土壤基质有关。

钙质结核的 pH 变化范围不大,多在 8.35—8.84 之间。钙质结核含无机碳。碳酸盐含量多达 290—726g/kg。据统计,锥形结核(n=7)的碳酸盐含量相对较少(424g/kg),完形结核(n=31)为 568g/kg,而硬磐(n=2)含量最高,达 715g/kg。其中碳酸钙约占碳酸盐总量的 97%。此外,尚有一定数量的碳酸镁和碳酸锶。

锥形钙质结核呈块状,与周围土体渐次过渡。薄片观察表明,它主要由泥晶质碳酸盐和少量微亮晶质碳酸盐胶结而成。并且结核中通常嵌埋有较多的土壤基质和大小为 0.01—0.1mm 的石英、长石、云母。完形钙质结核以姜状和浑圆形为主。由于固结、硬化成形,而硬度较大。它由微亮晶质和亮晶质的碳酸盐,以及大小约 0.005mm 的方解石胶结而成。某些结核中,石英和长石的含量可达 20%。结核中的一些大孔隙通常为方解石填充,呈晶管状或晶囊状。此外,铁锰质浸染斑较多,还嵌有不少的铁锰结核。钙质硬磐是由泥晶质或微亮晶质的碳酸盐、土、

沙,甚至动物化石(如鹿、诺氏古菱齿象等)胶结、固化而成的体积较大,内部分化不明显的,近似水平的基质状形成物。

X 射线衍射分析表明,各类型的钙质结核均以方解石矿物为主,且含有一定数量的石英和长石,以及少量的黑锰矿和水铁矿。根据衍射峰的高度判断,锥形结核中的方解石含量低于其他类型的结核,而土壤基质及石英、长石含量则相对丰富些。

(三) 钙质结核的元素地球化学特征

1. 钙质结核的化学组成

据统计,在锥形钙质结核化学组成中,以 SiO_2 含量最高(达 38%),其次为 CaO (24.4%)。诸元素氧化物的加权平均值序列如下: $\text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{MnO} > \text{P}_2\text{O}_5$ (表 7)。而完形钙质结核中的 CaO 含量都比锥形结核高 7%, SiO_2 量下降了大约 10%。这与完形结核中方解石含量高于锥形结核,而石英含量少于锥形结核的矿物学特性相吻合。因此,完形钙质结核的氧化物含量序列与锥形钙质结核稍有变化。其中 CaO 跃升为第一位, SiO_2 屈居第二,其余各氧化物含量的顺序基本保持不变。当然,不同地球化学环境条件下形成的完形钙质结核,个体差异也很大。主要表现为 MnO 含量的变幅较大,其次是 Fe_2O_3 、 Na_2O 和 P_2O_5 。铁锰氧化物含量的变化与完形钙质结核中的铁、锰质浸染斑及镶嵌的铁锰结核多少密切相关。至于钙质硬磐中的氧化物含量序列,基本类同于完形钙质结核。可见,随着钙质结核由锥形发育为完形,直至硬磐,它的地球化学特征表现为 SiO_2 含量明显减少, Al_2O_3 和 TiO_2 趋于减少,而 CaO 含量却大大增加。

表 7 钙质结核及其相应土壤的化学组成(%)

结核类型及其相应的周围土壤	样品数	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
锥形钙质结核	7	38.02 ±7.19	3.09 ±0.62	7.55 ±1.16	24.43 ±6.12	1.96 ±0.48	0.39 ±0.06	0.073 ±0.021	1.58 ±0.39	1.18 ±0.54	0.067 ±0.015
锥形钙质结核层土壤	6	61.78 ±2.11	4.85 ±0.77	13.01 ±1.09	6.13 ±2.25	2.05 ±0.59	0.60 ±0.07	0.093 ±0.043	1.98 ±0.20	1.49 ±0.17	0.102 ±0.01
完形钙质结核	26	26.95 ±8.64	2.57 ±1.00	5.72 ±1.48	32.70 ±6.5	1.61 ±0.51	0.26 ±0.07	0.139 ±0.133	1.49 ±0.56	0.82 ±0.39	0.057 ±0.028
完形钙质结核层土壤	23	62.79 ±6.09	5.61 ±1.17	14.09 ±1.61	4.27 ±4.12	1.89 ±0.44	0.66 ±0.10	0.132 ±0.116	2.01 ±0.24	1.26 ±0.42	0.123 ±0.164
钙质硬磐	2	13.98 ±3.20	3.15 ±0.29	4.98 ±0.18	40.03 ±2.36	1.73 ±0.19	0.25 ±0.02	0.220 ±0.040	0.29 ±0.17	0.29 ±0.17	0.057 ±0.04

钙质结核在由核心向外生长,由小到大的发育过程中,元素地球化学特征亦发生某些相应的变化。主要表现为结核内层相对富集钙元素,而贫缺硅、铁、铝、钛等元素,而外层正好与之相反(表 8)。

2. 钙质结核的微量元素丰度

钙质结核个体中的微量元素丰度差异较大,反映了它们的形成环境的复杂性。据初步统计,除 Sr 和 Pb 丰度超过克拉克值以外,其余各元素的丰度基本上均很低。完形钙质结核中的微量元素丰度序列是: $\text{Ba} > \text{Sr} > \text{V} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cu}$ 。锥形钙质结核序列与上述序列相同,且两种类型结核的 Sr/Ba 比值相近,均小于 0.6(表 9)。从表 9 中看出,随着钙质结核的发育, Cu 、 Zn 和 Sr 元素的丰度有增大的趋势。

3. 钙质结核的富集率

表 8 钙质结核内外层化学组成(%)的变化

采样深度(cm)	结核层次	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅
90-130	外层	20.1	5.17	6.85	35.7	0.80	0.37	0.05	1.99	0.014
	内层	15.3	3.07	5.68	40.7	0.55	0.25	0.05	2.06	0.008

为了阐明钙质结核形成过程中的富集状况,我们将钙质结核的化学组成和微量元素丰度与相应的土壤作一对比和计算。就完形钙质结核及其相应土壤的化学组成而言,钙质结核中富集的元素,正是土壤中相对贫缺的元素。(例如,钙质结核中的Ca量是相应土壤的4—8倍);反之,钙质结核中相对贫缺的元素,则相对聚集在土壤中。由于钙质结核的形成与地下水有关,根据波雷诺夫的元素迁移动力学理论,Si实际上是不活动的元素,而Al、Fe、Ti等则属于惰性元素,即活动性弱的元素。因此,钙质结核中的Si和Al含量只有土壤含量的1/2左右,Fe和Ti元素的含量也明显低于土壤。锥形钙质结核及其相应的土壤之间的关系大致与此相似。

表 9 钙质结核及其相应土壤中的微量元素丰度(mg/kg)

结核类型及其相应的周围土壤	样品数	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	Sr	Ba	Pb	Sr/Ba
锥形钙质结核	6	1.4 ±1.0	40.8 ±13.4	3.4 ±2.5	17.5 ±8.6	20.8 ±16.8	59.1 ±14.0	179.1 ±138.1	327.1 ±90.9	1.6 ±3.7	0.55
锥形钙质结核层土壤	3	6.5 ±0.9	93.2 ±21.5	14.0 ±2.2	45.8 ±7.6	54.1 ±11.9	114.5 ±17.4	122.4 ±80.1	543.9 ±17.3	18.8 ±2.2	0.23
完形钙质结核	10	2.0 ±2.5	24.0 ±16.8	4.6 ±4.4	11.4 ±7.7	13.9 ±15.7	35.3 ±17.0	197.7 ±157.6	336.8 ±165.2	5.8 ±8.8	0.59
完形钙质结核层土壤	6	3.7 ±8.6	116.1 ±66.4	9.4 ±8.2	31.5 ±16.9	156.6 ±129.2	104.1 ±34.4	135.8 ±149.5	559.8 ±213.3	13.5 ±7.7	0.24
钙质硬磐	1	3.6	35.5	13.2	24.4	4.0	54.5	332.1	256.7	tr	1.29
克拉克值		70	80	40	100	200	150	150	430	0.01	

比较钙质结核与其相应土壤的微量元素丰度时不难发现,Sr和Ca同是钙质结核形成中必不可少的重要元素。在表生地球化学条件下,Sr的地球化学行为类似于Ca,且比Ba更活跃。同时由于Sr的地球化学特点使它能比较经常地进入到各种富钙的矿物中。因此,有理由认为,Sr和Ca同时参与了钙质结核的形成。这也是钙质结核成份中既含有CaCO₃又含有SrCO₃的原因。锥形钙质结核富集率序列为:Sr|>Ba>V>Zn>Ni>Cr>Co>Cu>Pb。而在完形钙质结核序列中,除了Sr和Ba两种元素的顺序保持不变以外,其余元素的位置变化较大(Sr|>Ba>Cu>Co>Pb>Ni>V>Zn>Cr)。上述两个序列分异如此之大,除与元素的地球化学分异有关外,还与土壤或钙质结核的个体差异密切相关。

综上所述,钙质结核共同富集的元素为Ca和Sr。鉴于钙质结核类型的不同,富集的元素和序列亦略有差异。锥形钙质结核中Ca和Sr的富集率分别为3.99和1.46,而其余元素的富集率均小于1.00(表10)。它的元素富集率序列是:Ca>Sr|>Mg>K>Mn≈Na>P>Ti>Fe>Si>Ba>Al>V>Zn>Ni>Cr>Co>Cu>Pb。至于完形钙质结核,不仅富含Ca和Sr碱土金属,而且Mn亦有明显的富集。它们的富集率分别为7.46,1.46和1.05。在碱性环境下,完形钙质结核的形成过程中,土壤中的Mn比Fe更易迁移,从而导致锰在结核中的富集。因此,Ca、Sr和Mn三种元素是完形钙质结核形成过程中最活跃的元素。其序列表现为:Ca>Sr>Mn|>Mg>K>Na>Ba>Ca>Cu>Co>P>Fe>Si≈Pb>Al>Ti>V>Zn>Cr。

表 10 钙质结核的元素富集率

结核类型	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Ti	Mn	K	Na	P	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	Sr	Ba	Pb
锥形结核	0.62	0.64	0.58	3.99	0.96	0.65	0.79	0.80	0.79	0.66	0.22	0.44	0.24	0.38	0.38	0.52	1.46	0.60	0.09
富集率序列:Ca>Sr>Mg>K>Mn~Na>P>Ti>Fe>Si>Ba>Al>V>Zn>Ni~Cr>Co>Cu>Pb																			
完形结核	0.43	0.45	0.41	7.66	0.85	0.39	1.05	0.74	0.65	0.46	0.54	0.21	0.49	0.36	0.09	0.34	1.46	0.60	0.43
富集率序列:Ca>Sr>Mn>Mg>K>Na>Ba>Cu>Co>P>Fe>Si~Pb>Al>Ti>Ni>V>Zn>Cr																			

参 考 文 献

- [1] 耿国强、徐琪,苏北砂姜黑土与白浆土的形成同生态环境演变的关系,土壤学报,第24卷,第4期,1987。
- [2] Sidhu, P. S. et al, Composition mineralogy and genesis of Fe—Mn concretions from same soils of New India. Geoderma, 18, 1977.
- [3] 熊毅等编著,土壤胶体,科学出版社,1983。
- [4] 安徽省水利局勘测设计院、中国科学院南京土壤研究所,安徽淮北平原土壤,上海人民出版社,1976。
- [5] 刘良梧,砂姜黑土形成的历史过程——以淮北平原为例。淮北地区水土资源开发与治理研究,科学出版社,1992。

~~~~~  
(上接第228页)

参 考 文 献

- [1] 张守敬和 M. L., Soil. Sci., 84 : 133—134, 1957.
- [2] 顾益初、蒋柏藩,石灰性土壤无机磷分级测定方法,土壤,22(2) : 101—122, 1990。
- [3] 蒋柏藩,石灰性土壤无机磷有效性的研究,土壤,24(2) : 61—64, 1992。
- [4] 张淑茗等,施肥对石灰性土壤磷素形态的影响,土壤,24(2) : 68—70, 1992。
- [5] 李昌伟、李合生等,瘠土中无机磷的形态、转化及其植物有效性,土壤,24(2) : 65—67, 1992。
- [6] 刘景福等,土壤对磷的吸附特性与磷肥用量,土壤,24(2) : 90—92, 1992。
- [7] 成瑞喜等,用 ASI 法测定中酸性土壤有效磷结果比较,华中农业大学学报,12(4) : 343—346, 1993。
- [8] 顾益初、蒋柏藩,风化对土壤粒级磷素形态转化及有效性的影响,土壤学报,21(2) : 134—143, 1984。

~~~~~  
(上接第251页)

参 考 文 献

- [1] Wilding L. P. et al, Pedogenesis and soil taxonomy, I soil orders, Elsevier pub. Co., Amsterdam, 1983.
- [2] Murthy A. S. P., Advances in Soil Sci., Vol. 8, 1988.
- [3] Wilding L. P. and Puentes R., Vertisols, Texas A&M University Printing Center, P. 2—58, 1988.
- [4] 中国科学院南京土壤所土壤系统分类课题组,中国土壤系统分类课题研究协作组著,中国土壤系统分类(首次方案),科学出版社,1991。
- [5] Harvey Oakes and James Thorp, Soil Sci. Soc. Proc., 15 : 347—354, 1950.
- [6] Dasong G. S. and Hadimani A. S., J. of the Indian Soc. of Soil Sci., 28 : 49—58, 1980.
- [7] Mermut A. R. and Dasog G. S., Soil Sci. Soc. Am. J., 50 : 382—391, 1986.