

黄土高原土壤剖面元素相对迁移强度初探

田均良 刘普灵 李雅琦

(中国科学院 水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

近年来,随着土壤地球化学研究的进展,对土壤化学元素的研究,已由过去熟悉的常量元素,作物营养元素逐步拓宽至其它生命元素及过去研究中极少涉及的一些微量元素。这种土壤元素研究内容拓宽的趋势,反映了人们对土壤元素认识的不断深化,从而也促进了土壤研究的进展。如过去土壤学研究人员很少提及的稀土元素(REE),因其在农作物喷施产生的显著增产效果,近10年来对土壤稀土元素的研究愈来愈受到重视。特别是世界环境污染问题引起了人们对赖以生存的土壤环境的高度重视,使土壤化学元素的研究已不仅限于从土壤肥力角度提出的问题,而是广泛地关注土壤中一些微量元素的地球化学行为及其对生态环境的影响。生产与科学的发展,带动了用于土壤化学元素分析的现代理化测试技术的迅速发展,使我们已有可能较全面地研究诸多土壤元素的地球化学行为,从而为土壤的发生研究提供更为丰富的元素地球化学信息。

本文旨于探索剖面元素迁移强度的描述方法,讨论黄土高原土壤元素的迁移积聚等基本地球化学特征,以深化对黄土高原土壤发育过程及成壤环境的某些认识。并藉朱显谟院士八秩华诞之际,以此文作为学习朱先生黄土高原土壤研究学术思想点滴心得体会的汇报。

1 黄土高原土壤元素平均含量

表一列出黄土高原110个表层土壤样品的化学元素平均含量。为便于比较,同时列出全国表层土壤的平均含量。

在分析的39个元素中,黄土高原土壤中大多数元素和全国土壤元素平均含量十分接近。众所周知,土壤元素含量在很大程度上继承了成土母质的元素地球化学特征。由于表1中黄土高原土壤均发育于黄土,黄土高原土壤元素平均含量和全国土壤的近似也表明了黄土物质来源的广域特征,从而使黄土高原区域土壤和全国土壤的元素丰度在整体上差异不甚显著。但从表1仍可以看出,和全国土壤相比,黄土高原土壤相对富含水迁移能力强的K、Na、Ca、Mg等元素,而贫Hg、Se这类在较干旱的环境中易于逸失的元素。这反映了黄土高原土壤发育于干旱—半干旱环境的总体特征。

2 元素在土壤剖面上的分布

在成土过程中,由于各种成土作用的影响,形成了元素在各发生层间含量的分异现象。表2以塋土中的铁族元素和亲铜元素为例,列出元素在塋土剖面上的分布。不难看出,几乎全部铁族

表1 黄土高原和全国土壤元素平均含量比较 (单位:除注明单位外,其余均为毫克)

元素	黄土高原	全国土壤	黄土高原/全国
K(%)	2.06	1.86	1.11
Na(%)	1.30	1.02	1.28
Ca(%)	4.30	1.54	2.79
Mg(%)	1.25	0.78	1.60
Al(%)	6.33	6.62	0.96
Ti(%)	0.345	0.380	0.91
V	75.6	82.4	0.92
Cr	67.3	61.0	1.10
Mn	616	583	1.07
Fe(%)	2.95	2.94	1.00
Co	11.9	12.7	0.94
Ni	30.0	26.9	1.12
Cu	21.3	22.6	0.94
Zn	69.3	74.2	0.93
As	12.0	11.2	1.07
Sb	1.02	1.21	0.84
Hg	0.024	0.065	0.37
Pb	22.9	26.0	0.88
La	34.8	39.7	0.87
Ce	63.9	68.4	0.93
Nd	31.8	26.4	1.21
Sm	5.55	5.22	1.06
Eu	1.16	1.03	1.13
Tb	0.837	0.630	1.41
Yb	2.77	2.44	1.14
Lu	0.419	0.360	1.16
Sc	11.2	11.1	1.01
Rb	94.6	111	0.85
Cs	7.2	8.24	0.87
Zr	246	256	0.96
Hf	7.65	7.72	0.99
Ta	1.03	1.15	0.90
Sr	175	167	1.19
Ba	484	469	1.02
Se	0.129	0.290	0.45
Cd	0.105	0.097	1.08
F	444	478	0.93
U	2.50	3.21	0.78
Th	11.2	13.3	0.84

注:全国土壤元素含量引自中国环境监测总站主编《中国土壤元素环境背景值》,中国环境科学出版社,1990。

黄土高原土壤元素含量引自田均良等著《黄土高原土壤地球化学》,科学出版社,1994。

元素其含量呈粘化层>熟化层>母质层>钙积层,而亲铜元素 Hg 则明显表现为在剖面上自下而上升高的趋势。其它亲铜元素虽粘化层含量略高,但元素含量在发生层间的分异不如铁族元素明显。诚然,上述元素含量分异可能与在同一环境中元素因其化学性质差异而引起的元素间表生行为不尽相同有关。但仅由元素在土壤剖面上的分布特征,尚不能确定在成土过程中元素间迁移能力的差异,更不能简单地根据其剖面分布特征,断言铁族元素因在剖面上迁移而在缕土粘化层发生了积聚。元素在缕土粘化层含量升高主要受控于两个成土因素,其一是碳酸盐的淋溶,而使其它元素含量相对升高;其二是元素发生层间迁移中受粘粒的吸附而积聚。为了解土壤剖面元

素分布特征形成的机理,首先要研究元素在土壤中的迁移是否发生,及其迁移强度的差异。

表 2 元素在塋土剖面上的分布特征 单位:除 Fe 为%,Hg 为 mg/kg 土,均为 mg/kg

发生层	铁族元素								亲铜元素				
	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Hg	Pb
耕层	3215	79.0	73.1	666	3.23	13.5	33.5	25.2	74.1	14.8	1.29	59.2	24.8
熟化层	3544	81.7	69.0	678	3.24	13.2	31.0	21.8	66.5	12.8	1.10	55.4	24.9
粘化层	3700	90.6	77.4	760	3.78	15.5	34.7	24.6	79.3	15.2	1.27	32.7	25.8
淀积层	3120	74.4	66.4	603	3.11	12.9	29.8	21.1	61.0	12.8	1.09	15.8	23.3
母质层	3200	74.9	67.9	623	3.29	13.6	31.1	22.6	62.1	12.8	1.13	15.3	23.4

3 土壤剖面元素相对富集系数

应用元素地球化学的研究方法,在土壤元素迁移强度研究中引入相对富集系数。即选择假设在土壤发育中相对稳定不易迁移的元素(如 Al、Zr、Hf)等为参比元素,利用式(1)计算某一元素在一确定发生层中相对于成土母质的相对富集系数 CE。

$$CE_{ij} = (C_{ij}/C_{rj}) / (C_{ip}/C_{rp}) \tag{1}$$

式中,CE_{ij}为元素 i 在土壤剖面上第 j 层的相对富集系数;

C_{ij},C_{ri}分别为元素 i 和参比元素在 j 层的含量;

C_{ip},C_{rp}分别为元素 i 和参比元素在母质层的含量。

由于上式计算中以成土母质中元素的配比关系为基础,故在理论上应认为 CE 值偏离 1±ΔCE(ΔCE 为分析测定引起的总误差)范围以外的任何情况,均应视为在成壤过程中发生了元素迁移和元素在剖面上再分配的土壤地球化学过程。显见,在某一发生层若 CE 近似于 1,则表明该元素与参比元素的配分比例保持了母质的特征,在成壤过程未发生明显迁移现象;若 CE 显著大于 1,则说明该元素在研究的发生层中有迁移积聚现象;反之,若 CE 显著小于 1,则表示元素在该发生层中发生过淋失过程。

表 3 黄土高原土壤剖面元素相对富集系数 一以塋土剖面亲铜和铁族元素为例

发生层	铁族元素								亲铜元素					Ca
	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Hg	Pb	
耕层	0.96	1.01	1.03	1.02	0.94	0.95	1.03	1.11	1.19	1.15	1.14	3.85	1.05	0.56
古耕	1.07	1.06	0.98	1.05	0.95	0.94	0.97	0.87	0.97	0.90	0.88	3.27	0.96	0.43
粘化	1.03	1.08	1.02	1.09	1.02	1.02	1.00	0.94	1.10	1.03	0.97	1.85	0.95	0.33
钙积	1.01	1.03	1.01	1.00	0.98	0.98	0.98	0.96	1.01	1.03	0.99	1.06	1.02	1.22

表 3 以塋土剖面上的某些元素为例,计算了在各发生层的富集系数。显见,铁族元素在塋土各发生层的相对富集系数均在 1±0.10 范围内(ΔCE=0.10),说明铁族元素在塋土形成过程中,表现为相对稳定的表生行为。已知在黄土高原土壤中,铁族元素含量和土壤粘粒含量呈显著正相关(田均良等,黄土高原土壤地球化学,科学出版社,1994),故可以由此得出如下结论:在塋土形成过程中,粘粒在剖面上的移动、淀积现象不甚明显。这与朱显谟先生通过对黄土高原土壤剖面发生学特征研究,认为黄土高原的土壤粘化作用主要表现为就地粘化的结论相符。由表 3 中 Ca 的相对富集系数在发生层间的变化可以看出,塋土粘化层铁族元素含量升高现象,主要是由于碳酸盐在该层的淋失强度较其它层更为显著。相反,在钙积层则由于 Ca 的积聚而使大多数元

素含量相对降低。

亲铜元素的相对富集系数表明塋土在发育过程中,除 Pb 外其它元素均有不同程度的迁移。亲铜元素在塋土剖面上的分布特征,则是碳酸盐淋溶淀积作用和元素自身迁移积聚的复合因素影响的结果。事实上,除塋土外,黄土高原的主要土类中,亲铜元素的地球化学行为也均较铁族元素活跃。由于黄土高原土壤主要发育环境为氧化及弱碱性条件,上述土壤元素迁移能力的差异与元素在这种成壤环境中的表生行为相一致(D. H. Speidel,et al. ,Westview Press,1982)。

4 元素在土壤剖面上的相对迁移强度

为了探索元素在土壤形成过程迁移强度定量化指标的研究方法,作者引用统计学上离散度的概念,利用元素在各发生层的相对富集系数,按式(2)逐元素计算比较元素在土壤剖面上的 Q 值,以作为元素相对迁移强度的表征值。

Q_i = (\sum_{j=1}^n (1 - CE_{ij})^2 \times 100) / n \tag{2}

式中:Q_i 为元素 i 剖面迁移强度表征值,n 为剖面发生层数目,CE_{ij} 为元素 i 在发生层 j 的相对富集系数。由 CE_{ij} 的定义可以得出,若元素在各发生层的富集与淋失均不明显,则 Q≈0,表示该元素在剖面上迁移强度最弱。反之,若元素在成壤过程中相对活跃,相对富集系数 CE 在发生层间必分异明显,Q 值随 CE 分异的显著程度而变。Q 值愈高,表示元素在成壤过程中迁移能力愈强。

表 4 黄土高原主要土类元素的相对迁移、积聚强度比较 (以 Al 为参比元素)

迁移强度	Q 值	灰褐土	塋土	黑垆土	黄绵土	灰钙土
强	>10	Ca, Sr, Cd, Hg Se, Zn	Hg, Ca, Se	Se	Se	Dr, Hg, Se
中	1—10	Cu, Sc, Tb, Mg, K Yb, As, F, Na, Cs U, Th	Mg, K, Sr, Na	Ca, Sr, Sb, Mg	Sr, Ca (Zr, Hf, Eu) *	(Zr, Yb) *
弱	1—0.1	Nd, Hf, Mn, Co, Ta Sm, Eu, Ba, Rb, Lu V, Zr	Zn, Cd, U, Th	Ba, Na, Tb, U, Hg K, Co, Zn, Hf, Pb Cu, F, Yb, Lu, Mn Nd, Th	V, Ti, Cs, Cd, U Pb, Zn, Mg, Sb, Na Hg	As, Cs, F, Cu, Tb Mg, Cd, Ta, Na, K
极弱	<0.1	* Si, Fe, Ce, Cr, Pb Ni, La, Ti, Al	Sb, As, Cu, Ba, Hf Zr, Ce, Sm, Cs, F Mn, V, Lu, La, Ta Ti, Rb, Nd, Si, Pb Fe, Co, Tb, Eu, Yb Ni, Cr, Sc, Al	Ta, Zr, Ni, Cs, V As, Si, Ti, Fe Cd, Rb, Sc, La, Eu Cr, Sm, Ce, Al	Th, Co, Ba, Ni, Fe Ce, Tb, Rb, Cu, Ta La, Cr, As, F, Sm Yb, Nd, Mn, Sc, K Lu, Si, Al	Rr, Lu, Co, Ba, V Pb, Ni, Rb, Hf, Ce Th, Ti, La, Sc, Nd Fe, Mn, Si, Eu, Sm Sb, Al

* 可能与现代风沙沉降及风蚀有关。

表 4 利用计算出的元素平均 Q 值,对黄土高原主要土类中元素的迁移强度进行了分类。由分类结果可以看出,除少数几个元素(Z、Hg、Yb、Eu)可能是因现代风沙沉积及风蚀等原因,使土壤表层呈现粗粒化趋势,且这些元素多赋存于相对抗风化的砂粒中,从而使其 Q 值出现异常外,大多数元素 Q 值的分类均与在黄土高原成壤环境中元素的表生地球化学行为相符合。

1、土壤中不同元素的 Q 值极值相差高达二个数量级,反映了土壤元素间迁移能力的显著差异。大多数元素在黄土高原主要土类中的迁移强度较弱,这与黄土高原成壤过程中化学风化相对较弱的土壤发生特征相一致。

2、显示了同一元素在不同成土条件下迁移能力的变化。在林地土壤中,大多数元素较在其它土类中相对活跃。这与森林土壤较优越的水分条件,及较丰富的土壤有机质的积累与分解,土壤溶液相对偏酸性等土壤环境条件有关。因在这种条件下有利于大多数土壤元素的析出与迁移。

3、在黄土高原土壤中迁移能力较强的元素,除在较干旱的成土环境中易于迁移并在表层富集的 Hg、Se 外,还有碱土金属 Sr、Ca、Mg。值得注意的是在土壤剖面上 Sr、Ca、Mg 的迁移强度较表生环境中活跃的 K、Na 还要强一些。这可能反映了黄土物质在沉积前后已经过了一定的风化成土过程,K、Na 等易于从风化中析出的元素曾发生过强度可观的迁移与流失,在黄土母质发育为现代土壤的过程中,碱土金属 Sr、Ca、Mg 在剖面上的淋溶积聚再分配表现得比 K、Na 更为显著。两者的这种差异为黄土高原土壤的一个重要地球化学特征。

4、进一步显示了大多数铁族元素或具有亲铁性质的元素,几乎在所有土类中都表现得相对稳定,而亲铜元素如 Hg、Zn、Cd、U 等却相对活跃。这与两元素的化学性质所决定的在黄土高原弱碱性条件氧化环境中的表生地球化学行为相一致。

5 结 语

通过上述讨论,可以看出本文利用相对富集系数计算剖面元素 Q 值的方法,可对元素在剖面上的相对迁移强度进行分类,且分类结果总体上与元素在成壤环境中的表生地球化学行为相符。对土壤剖面元素迁移强度的定量研究,除可揭示更为丰富的土壤发生学信息外,也有可能为研究黄土高原环境气候的变迁提供土壤地球化学佐证。

(上接第 50 页)

续表 13

1976	0.131	0.108	17.6	0.689	0.629	8.7	0.087	0.343	-294.3
1977	0.465	0.619	-33.1	3.090	2.993	3.1	1.170	1.284	-9.7
1978	0.254	0.124	49.4	1.160	1.322	-14.0	0.505	0.600	-18.8
1979	0.067	0.105	-56.7	0.751	0.853	-13.6	0.384	0.349	9.1
1980	0.049	0.046	6.1	0.696	0.786	-12.9	0.130	0.120	7.7
1981	0.117	0.096	17.9	0.980	1.470	-50.0	0.087	0.317	-262.1
1982	0.037	0.041	-10.8	0.416	0.480	-15.4	0.107	0.097	9.3
1983	0.020	0.146	-630.0	0.339	0.896	-164.3	0.061	0.123	-101.6
1984	0.043	0.037	14.0	1.450	0.844	41.7	0.053	0.141	-166.0
1985	0.104	0.094	9.6	1.120	0.411	63.3	0.112	0.047	58.0
1986	0.110	0.016	85.5	0.648	0.603	6.9	0.081	0.056	19.8
1987	0.058	0.215	-270.7	0.492	0.546	11.0	0.220	0.201	8.6
1988	0.345	0.296	14.2				0.390	0.380	2.6
合格率			53.1			63.9			67.7

(2)流域产沙预报是一个复杂的系统,而影响流域产沙的一些主要因素(诸如降水),具有随机性,这就更增加了预报的难度。从本文分析来看,若要提高预报的合格率,必须增加流域控制雨量站的密度,并重视对暴雨点面关系的研究。

参考文献

1 蒋定生等. 黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究. 水土保持学报,1992,6(3)
2 刘元宝等. 黄河水沙时空图谱. 北京:科学出版社,1993
3 叶青超等. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究. 济南:山东科学技术出版社,1994