

砂质土壤不同粒径颗粒中有机碳、养分和重金属状况*

章明奎

(浙江大学环境与资源学院资源科学系, 杭州 310029)

摘要 用分散、筛分和悬浮相结合的物理方法,研究了砂质土壤中养分和重金属在不同粒径有机、无机颗粒中的分布。研究表明,砂质土壤中 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn 在颗粒状有机质(POM) 有明显的富集,富集程度以 Cu 和 Zn 最为明显。粒径较小(0.05~1 mm)的 POM 组分中重金属的平均富集高于粒径较大(>1 mm)的 POM 组分。POM 中重金属的富集因土壤重金属污染水平和重金属类型而异,并与土壤重金属的积累呈正相关。分析数据表明,土壤 POM 中重金属的积累不完全是植物分解残留的结果,土壤 POM 对重金属有强吸持能力可能是 POM 中重金属富集的主要原因之一。

关键词 颗粒状有机质; 重金属; 富集; 吸持

中图分类号 S153 文献标识码 A

土壤是一个由多种物质组成的非均质体,可分为有机物质和矿物质两大类。无论是有机物质还是矿物质,因种类和颗粒大小不同,其性质可有很大的变化,它们与土壤中养分和重金属的作用方式和强度也有很大的差异。已有研究表明,土壤有机质在促进微生物活动、养分循环和重金属的吸持与转化等方面有着重要的作用^[1-7]。除胡敏酸、富里酸和胡敏素外,土壤中还存在大量的颗粒状有机物质(Particulate Organic matter, POM)。土壤 POM 是指粒径在 0.05 mm 以上的土壤有机质组分,常用物理方法进行分离。POM 是一类腐殖化程度较低,但活性较高的有机碳库,在土壤碳、氮、硫循环中有着重要的作用^[6,8],易受人为活动(包括利用方式、施肥等)的影响。有关对土壤 POM 的研究,近年来才引起关注,目前的研究主要集中在碳、氮、硫的循环方面,对其与矿质元素,特别是与重金属的作用等方面尚缺乏深入研究。最近的研究表明^[9-12],土壤中 POM 含较高的 Cu、Cd、Pb 和 Zn,它对土壤中重金属有潜在的富集作用,但有关它们的富集作用机理还不清楚。砂质土壤在全球有广泛的分布,因其主要有砂粒所组成,缺乏胶体物质,这类土壤中腐殖物质常较低,因此 POM 作为这类土壤重要的碳库,在物质转化中起着特别重要的作用。为了了解 POM 在砂质土壤中对污染物循环的作用,本工作就砂质土壤中

养分和重金属在 POM 等组分中的分布特征进行了初步的研究。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

美国佛罗里达州是全球砂质土壤的集中分布的区域之一,代表性土壤为砂质灰土,在该州有大面积连片分布。根据土地的利用状况,本研究于 2002 年在佛罗里达州共采集了 14 个代表性土壤,采样深度为 0~15 cm,土壤类型属灰土土纲,砂质、硅质矿物型、高热的淋溶富铝潮湿灰土土族(sandy, siliceous, hyperthermic Alfic Alaquods)。根据研究目的可把土样分为二组:第一组是由利用方式不同的 4 个土样组成,用于研究各颗粒组分中重金属的分布。供试土壤基本性质列于表 1。4 个土壤的利用方式分别为林地(湿地松, *Pinus elliottii* Engelm)、橘园(葡萄柚, *Grapefruit*)、蔬菜地(长年种植青椒,品种为 HL189)和草地(百喜草, *Paspalum notatum*),代表了佛罗里达州土地的主要利用方式,利用时间均在 20a 以上。不同利用方式下土壤的 pH 和有机碳及重金属组成有较大的差异,林地土壤的 pH 较低,有机碳较高,保留自然灰土的特点;而其他用地由于长期施用石灰性物质, pH 已达到较高水平,不同于自

* 国家自然科学基金项目(40471064)和留学回国人员科研启动基金资助

作者简介:章明奎(1964~),男,教授,博士,从事土壤与环境方面的研究。E-mail:mkzhang@zju.edu.cn

收稿日期:2005-03-21;收到修改稿日期:2005-12-15

然的灰土。在采集土样同时采集相应的植物样品, 林地为新落的松针及松皮混合物, 橘园和蔬菜地为成熟的葡萄柚和青椒叶片, 草地为整株植物样(包括地上和地下二部分), 这些植物组织是目前进入土壤

中的主要有机物质。第二组土样共 10 个, 包括 4 个林地土壤、3 个橘园土壤和 3 个蔬菜园地土壤, 用于研究土壤重金属积累与土壤 POM 重金属浓度之间的关系。

表 1 不同利用方式土壤颗粒、有机质和化学组成

Table 1 Particle composition, organic C and chemical composition of tested soils under different land use

利用方式 Land use	林地 Forestry	橘园 Citrus	蔬菜地 Vegetable	草地 Grass
pH	5.2	7.3	7.2	7.1
有机碳 Organic C (g kg^{-1})	30.2	15.7	3.01	19.4
砂粒 Sand (0.02~2 mm, g kg^{-1})	950	951	942	963
粉砂 Silt (0.02~0.002 mm, g kg^{-1})	36	27	31	24
粘粒 Clay (<0.002 mm, g kg^{-1})	14	22	27	13
Ca (mg kg^{-1})	344	25500	2310	455
Fe (mg kg^{-1})	146	2040	604	801
K (mg kg^{-1})	13.4	31.2	37.7	25.4
Mg (mg kg^{-1})	56.8	2060	675	117
Na (mg kg^{-1})	14.5	48.2	21.4	13.6
P (mg kg^{-1})	30.1	598	338	81.7
Cd (mg kg^{-1})	0.09	0.61	0.11	0.08
Co (mg kg^{-1})	0.30	1.88	0.29	0.21
Cr (mg kg^{-1})	0.72	10.1	5.03	1.78
Cu (mg kg^{-1})	43.7	246	36.8	12.8
Ni (mg kg^{-1})	0.40	2.53	0.61	0.20
Pb (mg kg^{-1})	5.92	7.03	1.46	1.64
Zn (mg kg^{-1})	16.5	116	24.2	9.12
Mn (mg kg^{-1})	6.33	337	46.3	21.4

每个土样均为混合样, 各有 5 个以上样点混合而成, 采样量约 4 kg。土样去除新鲜的植物残物后, 在室内风干混匀。取其中 500 g 过 2 mm 土筛, 供土壤质地和 pH 测定, 部分样品进一步过 0.125 mm 土筛, 供有机质和全量分析。其余土样用于各粒径 POM 和砂粒等的分离。

1.2 第一组土样粒组的分离

采用分散、筛分和悬浮相结合的物理方法, 将土样分为 > 1 mm 砂粒、> 1 mm POM、0.05~1 mm 砂粒和 0.05~1 mm POM 和 < 0.05 mm 细土等 5 个粒组。操作方法如下: 称未过筛的风干土样 200 g, 重复 4 次, 各置于 3 000 ml 塑料瓶中, 加蒸馏水 2 000 ml, 并加入若干玻璃珠, 加盖在振荡机上振荡 24 h 进行机械分散后, 用系列土筛把土粒顺次分为 > 1、0.05~1 mm 和 < 0.05 mm 等 3 个粒级。基于 POM 和砂粒比重的差异, 采用蒸馏水多次反复悬浮的方法从 > 1 和 0.05~1 mm 2 粒级颗粒中把相应粒级的 POM 和砂粒进行分离。悬浮得到的 POM 用土筛去除水后, 小心收集。小于 0.05 mm 土粒用离心方法浓集。各粒组样品经 50 °C

以下烘干后分别计重。称重后, 同一土壤相同粒级的 POM 或砂粒样合并混匀后磨细过 0.125 mm 土筛, 供化学分析。据报道^[6], POM 基本上为有机组分, 残留的无机胶体仅微量出现, 砂质土壤本身因无机胶体很少, POM 中出现无机胶体的量更低。

1.3 第二组土样粒组的分离

分散方法同上。分散后土样直接用 0.05 mm 土筛分离 > 0.05 mm 颗粒, 然后用水多次反复悬浮分离总的 POM (> 0.05 mm 有机质)。样品在 50 °C 下烘干, 过 0.125 mm 土筛, 供全量分析。

1.4 化学分析

土壤 pH 用酸度计测定^[13], 颗粒组组成用微吸管法测定^[14]。分析表明供试土壤无碳酸盐(碳酸钙、碳酸镁), 因此, 土壤和各粒组组分中有机碳用 CN 分析仪直接测定(所用 CN 分析仪为德国产的 Vario MAX CN Macro Elemental Analyzer, Elemental Analysensystem GmbH)。植物样品用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波炉消化; 土样和各粒组样品(过 0.125 mm 土筛)用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消化, 消化液用等离子体发射光谱

法(ICP-AES, Ultima, J-Y Emission Divisional Instruments SA, Inc., Edison, NJ)测定矿质和重金属元素,重复3次,每10个待测样中包含1个标样检测仪器的稳定性,使回收率控制在90%~110%之间。所用仪器对重金属元素Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的检测下限分别为0.22、0.52、0.42、2.50、0.61、1.96和0.60 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤粒级组成及有机碳的分布

研究结果表明,各土样用物理分散方法获得的5个粒组颗粒总和占所用土样总重量的百分数为96.3%~97.5%,平均约97%;5个粒组有机碳的总和占所用土样有机碳的百分数为90.3%~95.9%,平均为

92.1%。供试4个土壤分离得到的颗粒均以0.05~1 mm砂粒为主(表2),在860~917 g kg^{-1} 之间,平均为885 g kg^{-1} 。其他颗粒在各土壤之间有较大的差异。颗粒状有机质总和(包括>1 mm POM和0.05~1 mm POM)均为林地>草地>橘园>蔬菜地,这与土壤有机碳总量一致(表1)。<0.05 mm细土占总土重的5.31~22.6 g kg^{-1} ,以蔬菜园地最高。各粒组的有机C含量有很大的差异,其中颗粒态有机质(POM)组分的有机C含量在342~451 g kg^{-1} 之间。>1 mm POM组分含有机C量高于0.05~1 mm POM组分。<0.05 mm细土也含较高的有机C量,明显高于整个土壤的含有机C量。而砂粒(包括>1 mm和0.05~1 mm二部分)的含有机C量均较低,在1 g kg^{-1} 以下。此外,POM组分的Ca、Fe、Mg、Na、K和P含量也明显高于砂粒,并与<0.05 mm细土较为接近(表2)。

表2 供试土壤各粒组的组成及其碳、钙、铁、镁、钠、钾和磷含量

Table 2 Particle fractions of the soils and C, Ca, Fe, Mg, Na, K and P concentrations therein

利用方式 Landuse	组分 Fraction	土壤各组分含量 Concentration of various fraction in soils (g kg^{-1})		组分中各元素含量 Concentration of some elements in different fractions					
			有机碳 Organic C (g kg^{-1})	Ca	Fe	Mg	Na	K	P
林地 Forestry	> 1 mm 砂粒 Sand	40.2	0.19	69.2	74.0	19.6	6.03	1.32	10.4
	> 1 mm POM	38.0	451	3070	972	603	74.0	94.3	256
	1~0.05 mm 砂粒 Sand	860	0.31	9.07	62.6	2.05	6.63	0.58	3.43
	1~0.05 mm POM	26.6	367	3970	1370	770	62.4	152	387
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	6.70	73.4	2716	1150	461	113	176	404
橘园 Citrus	> 1 mm 砂粒 Sand	57.9	0.11	20900	1180	666	111	25.5	2860
	> 1 mm POM	9.82	443	241000	29900	5340	149	244	7980
	1~0.05 mm 砂粒 Sand	870	0.15	11800	798	1070	18.3	3.94	143
	1~0.05 mm POM	23.6	394	207000	28800	9120	140	270	5360
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	13.8	27.6	112000	8930	42100	695	876	5980
蔬菜地 Vegetable	> 1 mm 砂粒 Sand	21.6	0.18	25100	6530	6740	93.9	29.7	1300
	> 1 mm POM	0.29	413	34900	9370	5960	256	376	6660
	1~0.05 mm 砂粒 Sand	917	0.83	646	202	195	9.11	5.06	99.5
	1~0.05 mm POM	2.91	401	30600	9830	3340	161	424	6400
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	22.6	31.4	47600	9430	11200	272	983	7820
草地 Grass	> 1 mm 砂粒 Sand	17.7	0.17	1880	3460	108	23.4	9.79	596
	> 1 mm POM	16.1	451	6990	16300	1510	59.9	192	799
	1~0.05 mm 砂粒 Sand	892	0.24	40.5	141	6.18	4.55	1.37	12.2
	1~0.05 mm POM	31.9	342	7360	6880	1800	68.1	383	1130
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	5.31	42.2	7150	9100	1250	87.1	387	1370

2.2 POM 中重金属的富集

在不受人为影响的条件下(如林地),砂质土壤矿物质主要由硅组成,重金属(Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn)和其他矿物元素(包括 Ca、Fe、K、Mg、Na、P)含量都很低(表 1)。而农业利用后(橘园、蔬菜地和草地),土壤中这些矿物质浓度均有显著的提高,其中以橘园和蔬菜地最为明显(表 1)。据研究^[15, 16],该地区农业利用土壤中 Ca、Fe、K、Mg、Na 和 P 浓度的提高与肥料施用有关,而重金属元素 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn 浓度的提高除与施肥有关外,还与除草剂、杀虫剂的施用有关。从污染角度来分析,橘园地土壤重金属污染最明显(表 1)。

重金属在各粒组之间有很大的差异, POM 组分中重金属浓度明显高于砂粒(表 3)。但 < 0.05 mm 细土中重金属含量与 POM 组分中的差异因土壤和元素而异。例如,林地、蔬菜地和草地土壤的 < 0.05 mm 细土中 Cd、Co、Cr、Ni、Pb 和 Mn 浓度与 POM 组分较为接近;但在橘园地土壤中, POM 组分中 Cd、Co、Cr、Ni、Pb 和 Mn 浓度明显高于细土,这可能与橘园地土壤具相对较高的 Cd、Co、Cr、Ni、Pb 和 Mn 含量,

而林地、蔬菜地和草地土壤中 Cd、Co、Cr、Ni、Pb 和 Mn 浓度均较低有关(表 1),即土壤污染可能会增加 POM 中重金属的积累。各粒组的重金属含量与土壤重金属含量的比值(以下称为相对富集系数, EF)可反映重金属在各粒组中分布的差异。0.05~ 1 mm 砂粒的重金属含量明显小于土壤, Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn 相对富集系数均小于 1, 平均分别为 0.16、0.35、0.39、0.11、0.27、0.18、0.16 和 0.29(图 1)。> 1 mm 砂粒对 Cd、Co、Ni、Pb、Zn 和 Mn 也有轻微的富集,其相对富集系数平均分别为 5.27、2.08、1.55、2.18、1.37 和 3.52, 但 > 1 mm 砂粒中 Cr、Cu 含量明显低于整个土壤的相应值,相对富集系数平均分别为 0.66 和 0.29。而 POM 组分对重金属的富集非常明显, > 1 mm POM 组分的 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn 的相对富集系数平均分别为 10.0、7.17、11.2、13.2、10.9、11.4、47.9 和 12.0, 而 0.05~ 1 mm POM 组分中 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Mn 的相对富集系数平均分别为 12.8、11.4、14.7、17.6、14.5、15.9、18.2 和 17.2, 高于 > 1 mm POM 的相应值。总的来看, POM 中 Cu 和 Zn 有较高的富集系数。

表 3 供试土壤各粒组的重金属组成

Table 3 Concentrations of heavy metals in different particle fractions of the tested soils

利用方式 Landuse	组分 Fraction	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
		(mg kg ⁻¹)							
林地 Forestry	> 1 mm 砂粒 Sand	0.02	0.21	0.50	2.37	0.06	0.83	1.99	3.39
	> 1 mm POM	0.72	1.44	4.39	166	2.27	50.6	118	32.9
	1~ 0.05 mm 砂粒 Sand	0.01	0.16	0.31	0.72	0.15	0.19	1.19	3.28
	1~ 0.05 mm POM	0.51	1.66	6.48	609	3.64	86.5	226	40.9
橘园 Citrus	< 0.05 mm 细土 Fine soil	0.74	1.62	6.32	2.380	4.29	180	516	39.2
	> 1 mm 砂粒 Sand	0.20	0.56	3.69	67.5	0.93	2.15	24.5	40.2
	> 1 mm POM	5.94	13.8	135	4.570	33.6	64.7	2.030	5.830
	1~ 0.05 mm 砂粒 Sand	0.32	1.15	4.75	32.0	1.10	3.80	23.3	83.2
蔬菜地 Vegetable	1~ 0.05 mm POM	7.43	18.7	123	4.720	35.7	79.5	2.560	7.340
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	2.01	2.86	27.2	1.880	6.47	39.7	422	1.350
	> 1 mm 砂粒 Sand	1.32	1.15	4.69	19.8	1.90	9.73	104	473
	> 1 mm POM	1.63	2.31	96.2	934	8.48	25.8	3.730	613
草地 Grass	1~ 0.05 mm 砂粒 Sand	0.01	0.08	1.78	7.88	0.17	0.14	6.41	14.0
	1~ 0.05 mm POM	2.23	4.55	131	911	11.7	27.3	478	1.200
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	2.37	6.07	102	942	13.7	41.6	536	757
	> 1 mm 砂粒 Sand	0.68	0.70	1.17	3.71	0.51	2.65	7.49	68.7
草地 Grass	> 1 mm POM	0.60	1.81	11.3	65.6	2.13	16.6	108	265
	1~ 0.05 mm 砂粒 Sand	0.01	0.01	0.58	0.84	0.01	0.05	1.02	1.74
	1~ 0.05 mm POM	1.05	3.03	20.8	161	3.12	30.9	153	316
	< 0.05 mm 细土 Fine soil	1.10	2.26	19.0	693	3.51	116	174	183

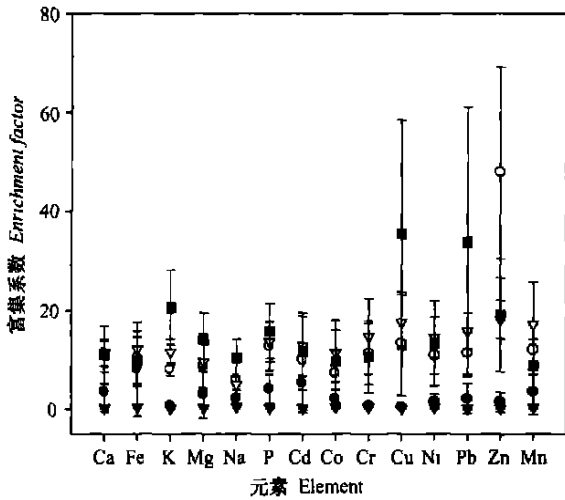


图1 供试4个土壤各粒组中矿物质和重金属的富集系数(EF)的平均值和标准差(富集系数为各组分与整个土壤中矿物质和重金属浓度的比值,图中●为>1mm砂粒,○为>1mm POM,▼为0.05~1mm砂粒,▽为0.05~1mm POM,■为<0.05mm)

Fig 1 Mean and standard deviation of enrichment factor (EF) for each metal in different particle fractions (● > 1 mm sand, ○ > 1 mm POM, ▼ 0.05~ 1 mm sand, ▽ 0.05~ 1 mm POM, ■ < 0.05 mm)

2.3 土壤中重金属浓度与 POM 中重金属浓度的关系

POM 中重金属浓度可因土壤差异有很大的变化。经常施用除草剂、杀虫剂的土壤(蔬菜地和橘园)因积累的重金属较多(表1),其 POM 组分中重金属浓度也较高(表3)。表4为第一组的4个土壤中重

金属浓度与从中分离得到的>1mm POM 和0.05~1mm POM等2组分中相同重金属浓度的相关分析结果。结果表明,除个别情况外,土壤中重金属浓度与>1mm POM 和0.05~1mm POM 等2组分中对应的重金属浓度之间均存在显著的相关。

表4 POM 组分重金属浓度与土壤重金属浓度之间的相关系数($n=4$)

Table 4 Correlation coefficients between the soils and POM fractions therein in heavy metal concentration

元素 Metal	土壤与>1mm POM Between soil and > 1 mm POM	土壤与0.05~1mm POM Between soil and 0.05~ 1 mm POM
Cd	0.991**	0.982*
Co	0.997**	0.987*
Cr	0.963*	0.845
Cu	0.985*	0.996**
Ni	0.995**	0.991**
Pb	0.975*	0.969*
Zn	0.310	0.999***
Mn	0.999***	0.998***

对第二组的10个土壤中重金属浓度与从这些土壤中分离得到的总POM(>0.05mm有机物质)中相同重金属的浓度之间的相关分析表明,二者之间存在极显著的正相关(表5)。这表明POM中重金属浓度可随土壤重金属积累的程度而增加。但富集系数与土壤重金属浓度无显著的相关(相关系数数据略)。而从回归方程斜率值还可知(表5),POM中Cu和Zn的富集程度较其他重金属高。

表5 土壤和POM中重金属含量及它们之间的相关性($n=10$)

Table 5 Correlation coefficients between soils and POM in of heavy metal content

元素 Metal	土壤中含量 Concentration in soil ($X, \text{mg kg}^{-1}$)	POM 中含量 Concentration in POM ($Y, \text{mg kg}^{-1}$)	富集系数 Enrichment factor	回归方程 Equation	相关系数 Correlation coefficient
Cd	0.01~0.33	0.03~2.26	3.00~15.8	$Y = 0.12 + 7.47X$	0.867**
Co	0.13~1.23	1.03~5.11	4.39~9.35	$Y = 0.65 + 4.27X$	0.950***
Cr	0.24~27.0	3.66~226	6.36~18.3	$Y = 7.78 + 7.49X$	0.970***
Cu	1.89~242	20.4~2200	7.35~24.5	$Y = 17.7 + 14.0X$	0.954***
Ni	0.62~1.64	0.99~11.9	2.47~8.60	$Y = -2.14 + 9.91X$	0.912***
Pb	0.79~5.81	13.9~64.8	8.84~27.5	$Y = 9.95 + 9.36X$	0.898***
Zn	1.33~46.0	7.20~932	5.41~20.2	$Y = -31.9 + 16.3X$	0.943***
Mn	3.56~165	10.9~1430	2.42~21.3	$Y = 74.1 + 9.77X$	0.886***

3 讨论

从元素循环的生物地球化学可知,POM 组分中

的重金属可能是富含重金属的植物组织分解后残留的,也可由植物分解的残留物从土壤中吸附重金属而积累。但通过植物组织分解而残留的重金属富集途径可能只适于解释有重金属超积累植物生长的土

壤, 不适于解释大部分其他土壤 POM 中重金属的富集^[9]。因此, 植物残物进入土壤后在矿化过程中与土壤发生作用可能是 POM 中重金属富集的重要途径(特别是非重金属超积累植物生长的土壤)。另外, 由于重金属对土壤微生物的活动有抑制作用, 重金属含量高的植物组织可优先残留在土壤中, 因此富含重金属的植物在土壤中分解后形成的 POM 常含较高的重金属^[9]。微生物可能在 POM 中重金属的富集中起到二方面的作用, 一是微生物在矿化有机物质的代谢过程中, 部分微生物残体积聚在 POM 中而增加了 POM 重金属的浓度^[17]; 第二是微生物对植物残体的分解存在选择性, 由于重金属对土壤微生物的活动有抑制作用, 微生物将优先分解重金属浓度低的植物组织, 而富含重金属的植物组织可抵抗微生物的分解而残留在土壤中, 相对增加了 POM 重金属的浓度。由于有机物质中的活性基团(如羧基、羟基和酚基等)可与重金属发生络合作用, 使重金属与有机质结合在一起, 进入土壤的有机

物质经轻度分解后, 有机质表面的活性基团逐渐增加, 可增加对重金属的吸附能力。由于土壤 POM 组分的矿化程度较小, 当土壤 POM 中重金属含量明显高于进入土壤的植物组织时, 通过化学吸附途径的 POM 中重金属富集可能是土壤 POM 重金属富集的主要途径。

表 6 为 4 个采样地进入土壤中的主要植物残体(干物)的重金属平均浓度, 表 2 和表 3 为土壤中分离获得的 POM 的矿质和重金属元素含量分析结果。二者结果比较可知, 在进入土壤中的植物残物转化为土壤 POM 组分的过程中, 矿质元素和重金属元素含量都发生了较大的变化。主要矿质元素 K、Mg 和 Ca 趋向下降, 而重金属元素(Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Ni、Pb、Zn 和 Mn) 均呈明显的增加, 其中以 Cu 和 Zn 的增幅最为明显。而 P 的变化与土壤含磷量有关, 含磷量较高的土壤(橘园土壤和蔬菜地土壤), 由植物组织至 POM, 含磷量增加; 相反, 含磷量较低的土壤(林地土壤和草地土壤), 由植物组织至 POM 含磷量下降。

表 6 植物样品中矿质元素和重金属的含量($n=3$)
Table 6 Concentrations of minerals and heavy metals in plant samples

元素 Metal	湿地松叶 Pine	橘叶 Citrus leaf	青椒叶 Pepper leaf	百喜草 Bahigrass
Ca (mg kg^{-1})	5 420 (0.57)	29 500 (8.17)	20 100 (1.74)	3 470 (2.01)
Cd (mg kg^{-1})	0.12 (6.00)	0.57 (10.4)	0.46 (3.54)	0.30 (2.00)
Co (mg kg^{-1})	0.32 (4.50)	1.79 (7.71)	1.83 (1.26)	0.16 (11.3)
Cr (mg kg^{-1})	0.44 (9.98)	2.67 (50.6)	2.50 (38.5)	0.69 (16.4)
Cu (mg kg^{-1})	6.6 (25.2)	12.2 (375)	50.6 (18.5)	14.2 (4.62)
Fe (mg kg^{-1})	93 (10.4)	120 (249)	108 (86.8)	127 (128)
K (mg kg^{-1})	1 600 (0.06)	12 700 (0.02)	40 100 (0.01)	17 200 (0.01)
Mg (mg kg^{-1})	1 420 (0.42)	36 500 (0.15)	52 100 (0.11)	2 180 (0.69)
Na (mg kg^{-1})	92 (0.80)	250 (0.60)	221 (1.16)	124 (0.48)
Ni (mg kg^{-1})	1.23 (1.85)	3.51 (9.57)	3.89 (2.18)	1.11 (1.92)
P (mg kg^{-1})	1 010 (0.25)	1 830 (4.36)	3 040 (2.19)	2 340 (0.34)
Pb (mg kg^{-1})	1.26 (40.2)	1.51 (42.8)	1.47 (17.6)	0.45 (36.9)
Zn (mg kg^{-1})	6.71 (17.6)	14.8 (137)	90.6 (41.2)	28.8 (3.75)
Mn (mg kg^{-1})	11.5 (2.86)	20.2 (289)	170 (3.61)	144 (1.84)

括号内数据为土壤中分离的 > 1 mm POM 与相应植物鲜物中矿质和重金属浓度的比值 Data in parenthesis is a ratio of each metal in > 1 mm POM fraction of soil to that in plant

表 6 括号内数据为从土壤中分离的 > 1 mm POM 与相应土壤植物残物中矿质和重金属元素的含量比值。可以看出, 从植物残物至土壤 POM, 不同元素的增减有很大的差异。例如, 林地土壤中 K、Na、Ca 和 Mg 浓度仅分别约为植物中的 6%、80%、

57% 和 42%, 而 POM 中 Cu、Zn 和 Pb 的浓度增至约为植物的 25.2、17.6 和 40.2 倍, 但 POM 中 Cd、Co、Cr、Fe、Ni 和 Mn 分别为植物的 6.00、4.50、9.98、10.4、1.85 和 2.86 倍。又如橘园地土壤的 > 1 mm POM 中 Cu、Cr、Fe、Pb、Zn 和 Mn 浓度约为植物样的

375、50.6、249、42.8、137和289倍,而POM中Cd、Co和Ni约为植物样的10.4、7.71和9.57倍。蔬菜地土壤和草地土壤中>1mm POM中重金属浓度与相应植物残物样中重金属浓度的比值也有很大的变化。虽然因植物类别的差异,从进入土壤的植物残物到土壤中形成的POM,矿质元素与重金属变化程度因植物类别有所差异,但POM中重金属浓度普遍明显高于植物残物相应的重金属浓度,可见,土壤POM形成过程中存在着明显的重金属富集现象。由于土壤POM与植物残物之间重金属浓度差异很大,所以土壤POM中重金属的富集很难用植物分解过程中重金属自身残留而富集可以解释,分解残留的有机物质对土壤重金属的选择性吸附可能也是POM中重金属富集的原因之一。由植物残物向土壤POM转化过程中,有机物质中的大部分矿质元素(K、Na、Ca和Mg)逐渐释放进入土壤。而不同重金属元素在由植物残物向土壤POM转化过程中富集倍数的差异很大,这种差异可能随土壤性质和有机物质组成而异。

矿物质和微量元素在土壤中的分布是不均匀的,但以往的研究偏重于矿物质和微量元素在土壤无机颗粒中的分布,很少考虑在土壤有机组分中的分布情况。已有的研究表明^[18~20],由于细颗粒具有较大的比表面积,养分、重金属等微量元素优先浓集于土壤细颗粒组分中。但本研究结果表明,颗粒状有机质对重金属等也有显著的富集作用,而其中的重金属正是连接植物与土壤之间重金属转化的重要部分,因此在研究土壤重金属的生物地球化学循环时,应重视这部分重金属的研究。

参考文献

[1] Dominy C S, Haynes R J. Influence of agricultural land management on organic matter content, microbial activity and aggregate stability in the profiles of two Oxisols. *Biology and Fertility of Soil*, 2002, 36: 298~305

[2] Heredia W, Peirano P, Borie G, *et al.* Soil organic matter metal interactions in Chilean volcanic soils under different agronomic management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 2083~2099

[3] Impellitteri C A, Lu Y F, Sake J K, *et al.* Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils. *Environmental International*, 2002, 28: 401~410

[4] Strawn D G, Sparks D L. Effects of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb(II) sorption and desorption in soil. *Soil*

Science Society of America Journal, 2000, 64: 144~156

[5] Vamault G, Bermond A. Trace metal sorption ability of insolubilized humic acids. *Environmental Technology*, 2002, 23: 421~428

[6] Wander M M, Bidart M G. Tillage practice influences on the physical protection, bioavailability and composition of particulate organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32: 360~367

[7] Weng L P, Temminghoff E J M, Lofts S, *et al.* Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36: 4804~4810

[8] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61: 1382~1386

[9] Balabane M, Faivre D, van Oort F, *et al.* Mutual effects of soil organic matter dynamics and heavy metals fate in a metallophyte grassland. *Environmental Pollution*, 1999, 105: 45~54

[10] Besnard E, Chenu C, Robert M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle size and density fractions in Champagne vineyard soils. *Environmental Pollution*, 2001, 112: 329~337

[11] Balabane M, van Oort F. Metal environment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1513~1516

[12] Zhang M K, Ke Z X. Copper and zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils. *Pedosphere*, 2004, 14: 27~36

[13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 132~502. Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese)*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Publishing House, 1978. 132~502

[14] Miller W P, Miller D M. A micro pipette method for soil mechanical analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18: 1~15

[15] Zhang M K, He Z L, Calvert D V, *et al.* Accumulation and partitioning of phosphorus and heavy metals in a sandy soil under long term vegetable crop production. *Journal of Environmental Science and Health (Part A)*, 2003, 38: 1981~1995

[16] Zhu B, Alva A K. Distribution of trace metals in some sandy soils under citrus production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 350~355

[17] Ledin M. Accumulation of metals by microorganisms—Processes and importance for soil systems. *Earth Science Reviews*, 2000, 51: 1~31

[18] Eary L E, Dhaupt Rai, Mattigod S V, *et al.* Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: II. Review of the minor elements. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19: 202~214

[19] Hinds A A, Lowe L L. Distribution of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus in particle size separates from gelysolic soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 1980, 60: 783~786

[20] Wang M C, Chen H M. Forms and distribution of selenium at different depths and among particle size fractions of three Taiwan soils. *Chemosphere*, 2003, 52: 585~593

DISTRIBUTION OF ORGANIC CARBON, NUTRIENTS AND HEAVY METALS IN DIFFERENT SIZE FRACTIONS IN SANDY SOILS

Zhang Mingkui

(Dept. of Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract Bioavailability of heavy metals in soil depends on composition of the soil. Characterization of heavy metal distribution among different size fractions of the soil is needed for better understanding of the fate of heavy metals. This study investigated distribution of organic carbon, nutrients, and heavy metals among different size fractions in sandy soil. Results show that heavy metals, including Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn, in the sandy soil were significantly enriched in particulate organic matter (POM), with Cu and Zn in particular, which were much higher in concentration than the others. It was more significant in 0.05~1 mm POM fraction than in > 1 mm POM fractions. The enrichment in the POM fractions varied with soils, and was positively related to accumulation of the metals in the soils. The enrichment of heavy metals in the POM fractions was not completely due to decomposition of plant debris. The strong heavy metal adsorption capacity of POM in the soil might be an important mechanism of heavy metal enrichment in POM fractions.

Key words POM; Heavy metals; Enrichment; Adsorption