

水溶性有机物在土壤剖面中的分馏及对 Cu 迁移的作用

王艮梅, 周立祥*

(南京农业大学资源与环境学院环境工程系, 南京 210095)

摘要: 通过室内土柱试验研究了 DOM 在土壤剖面中的“分馏”作用, DOM 在纵向运移过程中的穿透行为及对污染的红壤和潮土中重金属 Cu 溶出效果的影响。结果表明, 绿肥和猪粪 DOM 经过土柱后极性都有所降低, 在潮土上的降低幅度较大, 分别为 11.4% 和 10.72%; DOM 能够明显地增加污染土壤中 Cu 的溶出, 且这种作用效果与 DOM 及土壤的性质有关, 绿肥 DOM 的作用效果比猪粪 DOM 的强, 整个淋洗过程中潮土上 Cu 的平均溶出量是红壤上的 4.37 倍(绿肥 DOM)和 3.03 倍(猪粪 DOM); 由于微生物对 DOM 的分解作用, 降低了 DOM 对土壤中 Cu 的溶出效果。

关键词: DOM; 分馏作用; 铜; 淋滤; 土柱

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)06-1229-06

Vertical Fractionation of Dissolved Organic Matter and Its Effect on the Transport of Cu in Cu-Contaminated Soils

WANG Genmei, ZHOU Lixiang

(Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The vertical fractionation of DOM and its effect on Cu transport in acidic and calcareous Cu-contaminated soils were studied in column experiments. The results showed that the polarities of DOM derived from green manure and pig manure were obviously decreased by 11.4% and 10.72%, respectively, when they were leached through soil columns, especially in the calcareous soil. Dissolved organic matter can increase the dissolution of copper from the two copper-contaminated soils, but the dissolution effect was influenced by the properties of DOM and soils. For example, the ability of DOM derived from green manure to increase copper dissolution was stronger than that of DOM from pig manure. On average, the amounts of copper into effluent leached by green manure DOM or pig manure DOM in the column packed with a calcareous soil are 4.37 and 3.03 times higher than that in the column packed with an acidic red soil, respectively. In addition, it was observed that Cu dissolution from soils facilitated by DOM was decreased due to microbial degradation of DOM in soils.

Key words: DOM; fractionation; Cu; leaching; soil column

农地施用绿肥和农家肥(如畜禽粪便等)是我国农业生产中最普遍的农艺措施之一, 对维持我国地力数千年不衰作出了重要贡献^[1]。普遍认为, 有机肥料的施用, 还能有效钝化重金属的活性, 因此增施有机肥常被看作是重金属污染土壤的重要改良方法^[2,3]。然而, 近 10a 的研究发现, 在某些土壤和局部地区, 尤其在施用过有机物料如有机肥和污泥的土壤上, 明显存在重金属的活化和迁移淋滤现象^[4]。

近 10a 大量研究已经证实, 溶解性有机质(DOM)是促进污染物活化和迁移重要因素之一^[5-12]。例如, 在含水多孔介质和地下含水层中, DOM 对重金属淋溶的促进作用尤其明显, 含水砂层中微生物代谢产生的 DOM 仅 $10\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 便可使 Cd、Pb 的吸附能力分别降低 90%、60%^[6]。Lamy 等发现^[13], 在施用污泥的土壤中, 土壤深层或土壤排

水中的重金属浓度与其 DOM 浓度呈显著正相关。由于 DOM 也是微生物活动的重要的物质和能量来源, 因此在土壤中部分 DOM 容易被微生物降解利用^[14,15]。例如, Zhou 和 Wong 发现 DOM 在土壤中降解速度很快^[16-18]。此外, DOM 也能被土壤固相吸附。因此, DOM 在向土壤深层迁移过程中极可能因微生物活动和土壤吸附等因素的影响而对 DOM 产生“分馏”作用(指由于 DOM 各组分被土壤固相吸附能力和抗生物降解能力的不同, 导致 DOM 在经过土壤后各组分的相对比例发生明显变化的现象^[19]), 导致 DOM 性质发生改变, 这对土壤中污染

收稿日期: 2005-06-30; 修订日期: 2005-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(30170537, 40571073); 香港研究资助局项目(HKBU 2062/02M)

作者简介: 王艮梅(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境污染化学。

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

物如重金属环境行为将可能产生较大影响. 然而有关这方面的研究还鲜见报道, 为此, 本研究采用土柱模拟试验, 以绿肥和猪粪的 DOM 为代表, 以期预测 DOM 对环境的潜在影响提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试污染土壤为 2 种, 1 种为红壤, 取自江西德

兴铜矿附近的铜污染土耕作层(0~ 15cm); 另 1 种为潮土, 取自江苏徐州某老果园土(0~ 10cm). 土壤取回后, 风干, 过 20 目筛备用. 供试有机物料分别为猪粪和绿肥. 其中猪粪取自校猪场, 风干后不锈钢粉碎机粉碎, 过 60 目筛备用. 绿肥为苗期的蚕豆 (*Vicia faba* L.) 地上部, 风干, 粉碎备用. 猪粪和绿肥的 DOM 提取按参考文献[20] 进行. 供试土壤和有机物料 DOM 的基本性状见表 1.

表 1 供试污染土壤和有机物料的基本性质

Table 1 Fundamental physic-chemical properties of the selected Cu-contaminated soils and organic matters

项目	pH (H ₂ O)	DOC / mg·kg ⁻¹	总有机 C / %	全 N / %	全 P / %	粘粒含量(< 0.01mm) / %	总 Cu / mg·kg ⁻¹	水溶性 Cu / mg·kg ⁻¹
红壤	4.75	50.9	1.21	0.067	0.103	34	257.9	0.45
潮土	7.53	60.0	1.47	0.063	0.133	15	230.1	0.63
猪粪	7.99	14 740	22.8	1.61	1.64	—	635	43.2
绿肥	5.69	136 920	43.2	3.18	0.29	—	29	3.6

表 2 供试 DOM 的基本性质

Table 2 Fundamental properties of DOM derived from green manure and pig manure

DOM 来源	亲水性组分/ %	疏水性组分/ %	低分子量组分(< 1 000)/ %	pH(H ₂ O)	水溶性 Cu/mg·L ⁻¹
绿肥	72.27	27.73	90	5.32	0.09
猪粪	54.02	45.98	76	7.89	1.08

1.2 土柱制备

土柱采用外径为 4cm(内径为 3.6cm), 长度为 25cm 的硬质玻璃管制成. 柱子的下端为漏斗形, 通过橡皮管接在下端的细玻璃管口. 在装土前柱子底部放置少许玻璃棉, 然后加一些玻璃珠. 为了减少土柱的边缘效应装土前还在柱壁均匀涂抹一层很薄的凡士林, 以防柱壁水流过快而影响试验结果. 然后按照试验要求装入土样(Cu 污染的红壤或潮土). 装土时, 土层高度保持一致, 均为 15cm, 装填密度为每 5cm 装土 50g(土壤容重相当于 0.98g/cm³). 在淋洗前用超纯水湿润饱和土壤(从柱子底部吸水), 并保持土柱上层大约为 1cm 水层.

1.3 试验设计

按土柱制备的要求将土壤(红壤和潮土)装柱, 超纯水湿润饱和土壤后, 取一定体积、已知极性和浓度(800mg·L⁻¹) 的绿肥 DOM 溶液(简称“GM”, 以下同)和猪粪 DOM 溶液(简称“PM”, 以下同)从柱的上部淋洗土壤柱, 注意加入 DOM 溶液时不搅动土柱上层的土壤溶液(尽量保持溶质在运移过程中处于均匀向下移动), 靠重力作用自然淋洗, 每 10mL 收集 1 次滤液, TOC 仪(TOC-5000A, Shimadzu)

测定滤液水溶性有机碳 DOC. 待溶液中 DOM 含量大幅度增加时开始收集淋洗液, 淋洗液收集的体积同加入的 DOM 溶液的体积相同, 然后通过 XAD-8 树脂柱法分离亲水-疏水组分, 测定淋洗液中 DOM 的极性^[24,26], 以了解 DOM 在垂直向下运移过程可能产生的“分馏”作用. 每个处理 3 个重复.

为进一步了解 DOM 在土壤剖面中运移对污染土壤 Cu 溶出效果的影响, 设计如下 3 种处理, 用超纯水湿润饱和土壤柱后分别用超纯水(CK)、绿肥 DOM 溶液和猪粪 DOM 溶液从土柱上部淋洗土壤柱, 靠重力作用进行自然连续淋滤. DOM 溶液浓度为 800mg·L⁻¹, 每个处理设置 3 个重复. 每 25mL 收集 1 次淋滤液, 共计收集 10 次. 测定滤液的 pH, DOC 和 Cu 含量.

1.4 分析项目及测定方法

DOM 组分测定: 亲水性和疏水性组分采用 XAD-8 树脂柱分离法进行^[17], 表观分子量大小测定采用透析法进行^[16]; Cu: 火焰原子吸收分光光度法(Z-8000, HITACHI); DOC: 总有机碳自动分析仪(TOC-5000A, Shimadzu) 测定; pH: pH 计(pHS-2TC) 测定.

2 结果与讨论

2.1 DOM 在土壤剖面中的“分馏”作用

表 3 列出了绿肥和猪粪 DOM 过土壤柱后极性 (亲水性组分占总 DOM 量的百分比) 的变化结果. 结果表明, 在 2 种土壤上, DOM 过柱后极性都有所降低, 即 DOM 中疏水性组分比例上升. 其中 GM、PM 2 种处理的 DOM 在 2 种土壤上极性降低的百

分率分别为 11.4% (潮土)、5.09% (红壤) 和 10.72% (潮土)、2.7% (红壤). DOM 极性在潮土上的降低幅度比在红壤上的降低幅度要大, 而且绿肥和猪粪 2 种 DOM 在同种土壤上的变化差别也较明显, 绿肥 DOM 过土壤柱后极性降低的幅度大于猪粪 DOM, 但由于绿肥 DOM 起始的极性较大, 因此, 过土柱后极性仍然大于猪粪 DOM.

一般认为, 影响 DOM 在土壤中的含量和组成

表 3 绿肥、猪粪 DOM 过土壤柱前后亲水性组分占总 DOM 量的百分比变化¹⁾ / %
Table 3 Changes of proportion of the hydrophilic fractions of DOM derived from green manure and pig manure through soil columns / %

DOM 来源	过土壤柱前	过土壤柱后			
		潮土	下降百分率	红壤	下降百分率
GM	72.27(1.84)	64.03(2.4)	11.4	68.59(3.21)	5.09
PM	54.02(1.32)	48.23(4.37)	10.72	52.56(2.68)	2.7

1) $R_{0.01} = 0.735$ ($n = 10$), 括号内数字为标准差, 不同

的因素主要是土壤颗粒的吸附作用和微生物降解作用综合的结果. 土壤中存在大量的微生物群落, 当 DOM 从土壤表层向深层迁移时, 分子量较小易于被分解的亲水性组分逐渐被微生物降解利用, 因此, 随着 DOM 的下移其亲水性组分所占的比例逐渐降低, 即 DOM 极性逐渐降低; 另一方面, 土壤作为一个巨大的吸附体系会大量地吸附 DOM, 而 DOM 的不同组分在土壤中的吸附状况有较大的差异, 通常低分子量或亲水性组分较高的 DOM 不易被土壤吸附, 而高分子量或疏水性组分则容易被土壤吸附. 与猪粪 DOM 相比, 绿肥 DOM 中含有易降解的亲水性组分和小分子组分较多, 而易被土壤吸附的疏水性组分较少, 因此表现为, 在相同的土壤中绿肥 DOM 极性组分降低程度高于猪粪 DOM, 这也表明在本试验中微生物对 DOM 的降解是造成 DOM 组分发生“分馏”的主要因素. 至于 DOM 过柱后在红壤上极性变化小于在潮土上的变化, 则可能归因于红壤含有较多的 Fe、Al 氧化物和氢氧化物, 对 DOM 的吸附作用强于潮土, 能够抵抗微生物对 DOM 的降解所致.

DOM 这种“分馏”作用对于 DOM 在环境中对一些污染物的行为具有非常重要的意义. 亲水性组分所占比例较多的 DOM 对重金属如 Cu 和 Cr 的活化能力比疏水性组分较多的 DOM 大 2~8 倍, 而对于 PAHs 等疏水性污染物的迁移, 疏水性组分较多的 DOM 则起更大作用^[21, 22]. 对于土壤来说, DOM 过柱时极性下降, 有利于土壤颗粒对污染物的吸附, 降低其活性. 但随着经过土壤层次后未被吸附的

DOM 的淋出进入水体, 则有可能导致重金属和一些有机污染物如杀虫剂、合成农药和一些工业污染物如 PAHs 等在更大范围内扩散^[3], 污染水生生态系统.

2.2 DOM 在土壤垂直剖面上的运移规律

DOM 在土壤剖面上运移规律的变化通过淋洗液中 DOM 相对浓度 c/c_0 (淋洗液中 DOM 的浓度/初始 DOM 浓度) 的变化来反映. 图 1 为绿肥和猪粪 DOM 溶液过土柱后淋洗液中 DOM 相对浓度的动态变化结果. 从图中可以看出, 淋洗液中 DOM 的相对浓度 c/c_0 随着淋洗液体积的增加逐渐增大. 这是由于土柱中的溶液逐渐被 DOM 溶液所代替. 当淋洗液达到 150mL 时 c/c_0 趋于稳定, 说明此时土柱的溶液基本都是 DOM 溶液, 2 种土壤上 c/c_0 表现出相类似的规律.

在初始 DOM 浓度相同的条件下, 淋洗液中绿肥 DOM 的 c/c_0 值大于猪粪 DOM 的 c/c_0 , 这说明绿肥 DOM 在土柱中的穿透能力比猪粪 DOM 的穿透能力强, 这主要受 2 种 DOM 自身性质的影响, 由 2.1 中分析知 DOM 在土壤运移过程中同时受土壤颗粒的吸附和微生物降解 2 种作用, 使得其含量降低. 很显然, 结果显示绿肥 DOM 在运移过程中所受这种综合作用的效果要小于猪粪 DOM. 这主要可能是由于绿肥 DOM 中的亲水性组分及低分子组分含量大于猪粪 DOM (表 2), 相对来讲, 土壤对绿肥 DOM 的吸附能力较小, 而对疏水性组分及高分子量组分含量高的猪粪 DOM 吸附作用较强. 因此, 淋洗液中绿肥 DOM 的 c/c_0 值大.

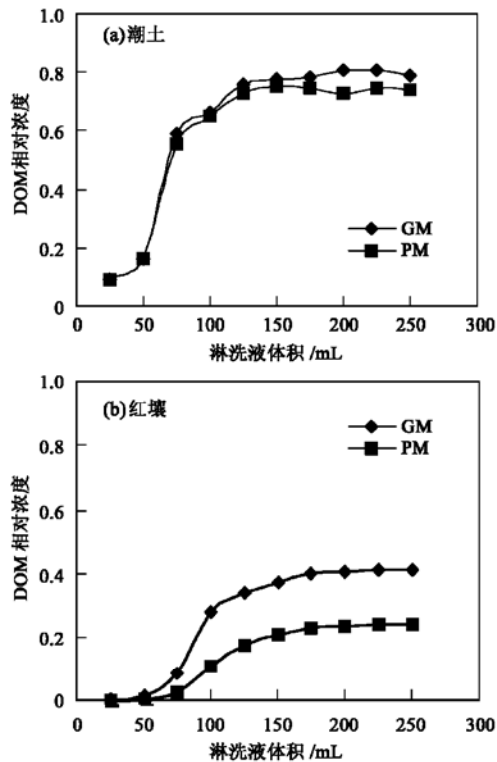


图1 DOM溶液淋洗土柱后淋洗液中其相对浓度 c/c_0 的动态变化

Fig. 1 Dynamics of c/c_0 in acidic and calcareous soil columns leached by green manure (GM) and pig manure (PM) solutions at 25 °C

此外,从图1中还可看出,同种DOM的 c/c_0 值在2种土壤上差异也很明显.其中,潮土上淋洗液中DOM的 c/c_0 值都对应的大于红壤上的 c/c_0 值.当淋洗液体积为150mL时,潮土上绿肥DOM与猪粪DOM的 c/c_0 值为0.7766(GM)和0.7554(PM),分别是红壤上对应处理的2.1倍(GM)3.6倍(PM).这主要是由于红壤上的铁、铝氧化物及粘粒含量等都比潮土高,负电荷密度较低,对DOM的吸附作用大于潮土,因此潮土的淋洗液中DOM的含量就相对较高.

2.3 DOM溶液淋洗作用下污染土壤Cu溶出的动态

图2显示了绿肥、猪粪DOM溶液淋洗土柱后,污染的红壤和潮土中Cu的溶出动态的结果.可以看出,不论在红壤上还是在潮土上,总体而言,在淋洗的初期(淋洗液体积为75mL之前),3种处理之间基本没有差异,而随着淋洗液体积的增加,GM、PM处理的淋洗液中Cu的含量明显的比超纯水淋洗的对照处理中的Cu含量高.在淋洗开始时3种处理的土柱都预先用超纯水饱和,因此,淋洗初期3

种处理淋洗液中Cu的含量差异不大.随着淋洗过程的进行,DOM溶液逐渐进入土柱代替超纯水并饱和土柱,由于DOM能够与Cu形成可溶性的DOM-Cu络合物,减少了土壤对Cu的吸附作用,Cu在土壤中的迁移性增加,因此,GM和PM的2种处理的淋洗液中Cu的含量比对照明显增加.对于GM和PM的2种处理来说,随着淋洗液体积的增加,土壤中Cu的溶出量也都相应的增加,直至淋洗液体积为150mL左右,Cu的溶出量趋于平缓,而2种土壤上对照处理的Cu的溶出量在淋洗液为75mL之前先上升,而后则呈现下降的规律.

不同来源的DOM溶液对污染土壤Cu的溶出作用能力不同.根据图2可知,GM和PM的2种处理在淋洗的初期淋洗液中Cu的含量差别不大,到淋洗液为75mL时,不论在红壤还是在潮土上2种处理的淋洗液中Cu含量都表现出明显的差别.很显然,绿肥DOM对Cu的溶出作用大于猪粪DOM的作用,在2种土壤上表现出相同的规律.在整个淋洗过程中GM处理的淋洗液中Cu的溶出量平均比PM处理的高22.22%(红壤)和76.19%(潮土).淋洗液中Cu含量的这种差异仍然与2种DOM的性质有关(见表2).通常认为,亲水性组分或低分子量

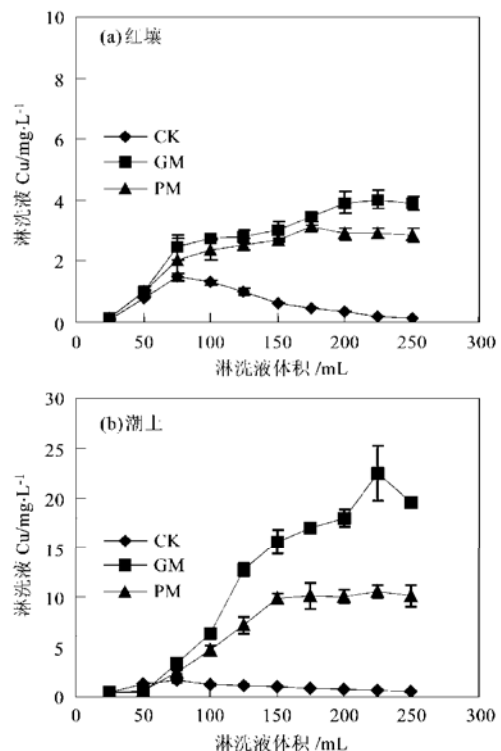


图2 DOM对污染土壤中Cu溶出动态的影响

Fig. 2 Dynamic changes of Cu leaching from contaminated acidic and calcareous soils influenced by DOM from green manure and pig manure at 25 °C

组分含量高的 DOM 与 Cu 的亲合力大,络合 Cu 的能力强^[23],对土壤中 Cu 的活化、迁移的作用大。

图 2 还表明,相同 DOM 溶液处理的土壤 Cu 的溶出动态在 2 种土壤上的溶出含量差异很大,其中绿肥和猪粪 DOM 淋洗的土壤淋洗液中的 Cu 在潮土上的含量明显的比在红壤的含量高,在潮土上的平均含量分别是红壤上的 4.37 倍(GM)和 3.03 倍(PM)。而对照处理的淋洗液中 Cu 的含量在 2 种土壤上差别不大,潮土上淋洗液中 Cu 的含量对应的略高于红壤。从 2 种土壤的基本性质知(见表 1),2 种土壤的总 Cu 含量红壤比潮土略高,而水溶性 Cu 基本相近。也就是说 2 种土壤淋洗液中 Cu 含量的差异并不是由土壤 Cu 含量差异引起的,而且通过测定淋洗液的 pH 值发现(见表 4),红壤上对应处理

的 pH 值都低于潮土,仅就 pH 而言,理论上红壤淋洗液中的 Cu 含量应高于潮土,这说明 2 种土壤上 Cu 溶出量的差异并不是由于 pH 低而使 Cu 的溶解性增加而直接导致的。在低 pH 值条件下(红壤),DOM 容易被质子化,且红壤上的 Fe、Al 氧化物等对 DOM 的吸附作用较强,减少了其对 Cu 活化的 DOM 量(见图 1:淋洗液中 DOM 的 c/c_0 值),与潮土相比这又使得红壤上 DOM 与 Cu 的络合能力降低,因此对土壤中 Cu 的活化能力减弱;而潮土 pH 值较高,一方面对 DOM 的吸附作用较红壤弱,另一方面高 pH 值条件下 DOM 的脱质子作用强,表面的负电荷增多,能够提供更多的 Cu 的吸附位,从而增强了对 Cu 的络合能力。

此外,通过淋洗液中 DOM 的含量与 Cu 含量的

表 4 淋洗液中 pH 值的变化
Table 4 Changes of pH value in soil column leachates

淋洗液体积 /mL	红壤			潮土		
	CK	GM	PM	CK	GM	PM
25	4.85(0.03)	5.06(0.04)	4.99(0.01)	6.99(0.01)	6.89(0.04)	7.04(0.02)
50	5.03(0.1)	5.25(0.03)	5.6(0.08)	7.05(0.02)	7.11(0.02)	7.23(0.06)
75	4.87(0.04)	5.85(0.11)	6.25(0.12)	7.12(0.02)	6.75(0.1)	7.48(0.01)
100	5.21(0.01)	5.69(0.21)	7.03(0.13)	6.94(0.04)	6.83(0.04)	7.45(0.04)
125	5.23(0.05)	5.73(0.09)	6.84(0.01)	7.07(0.02)	6.68(0.01)	7.33(0.1)
150	5.28(0.2)	5.64(0.13)	6.77(0.04)	7.19(0.01)	6.51(0.03)	7.86(0.01)
175	5.36(0.07)	5.63(0.04)	6.39(0.2)	7.23(0.11)	6.33(0.01)	7.68(0.02)
200	5.33(0.08)	5.58(0.02)	6.21(0.02)	7.18(0.06)	6.32(0.04)	7.7(0.01)
225	5.49(0.11)	5.62(0.1)	6.33(0.22)	7.2(0.23)	6.1(0.01)	7.65(0.05)
250	5.38(0.2)	5.47(0.02)	6.08(0.05)	7.25(0.07)	5.91(0.05)	7.72(0.01)

相关性分析也表明两者之间存在显著的正相关关系(见表 5)。这也表明,在本试验中 2 种土壤的淋洗液中 Cu 含量的差异主要是由 DOM 在 2 种土壤上的性质行为决定的。

表 5 淋洗液中 DOM 与 Cu 含量的相关性分析(R^2)
Table 5 Correlations between DOM and Cu contents
in soil leaching solution

处理	CK	GM	PM
红壤	0.555 1	0.935 6	0.933
潮土	0.816 6	0.703 8	0.788 7

3 结论

(1) 绿肥和猪粪 DOM 经过土柱淋洗后,由于微生物降解和土壤的吸附两者综合作用,DOM 的极性有所降低,且极性变化的幅度受土壤性质的影响,在 pH 值较高的潮土上 DOM 极性降低幅度较大。

(2) DOM 在土壤中的“分馏”作用对一些污染物的环境行为具有很大影响,对于土壤来说,DOM 过柱时极性下降,有利于土壤颗粒对污染物的吸附,降低其活性。但随着经过土壤层次后未被吸附的 DOM 的淋出进入水体,则有可能导致重金属和一些有机污染物如杀虫剂、合成农药和一些工业污染物如 PAHs 等在更大范围内扩散,污染水生生态系统。

(3) DOM 溶液在潮土上的穿透能力大于其在红壤的穿透能力,且在 2 种土壤上都表现为绿肥 DOM 的穿透能力强于猪粪 DOM。DOM 溶液能够明显的增加污染土壤中 Cu 的溶出,提高 Cu 的迁移性,而且在高 pH 值的潮土上比在低 pH 值的红壤上对 Cu 的溶出能力更强。

(4) DOM 溶液对 Cu 的溶出能力受自身的来源和性质的影响。含低分子量和亲水性组分较多的绿肥 DOM 对 Cu 的活化能力大于猪粪 DOM 对 Cu 的活化能力。

参考文献:

- [1] 胡霭堂主编. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995, 157~ 161.
- [2] 杨永刚. 绿色食品产地土壤质量评价及有机肥对产地土壤中微量元素化学行为影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 1996.
- [3] Magee B R, Lion L W, Lemiey A T. Transport of dissolved organic macromolecules and their effect on the transport of phenanthrene in porous media [J]. Environ. Sci. Technol., 1991, **25**(2): 323~ 331.
- [4] 周立祥, 胡霭堂, 戈乃珍. 城市生活污水中锌及病原物对作物及土壤环境的影响[J]. 农业环境保护, 1994, **13**(4): 158~ 162.
- [5] 吴龙华. 有机物料对 Cu 污染土壤的修复: 水溶性有机物及 EDTA 对红壤中 Cu 释放的影响[J]. 土壤, 2000, **32**(2): 62~ 66.
- [6] Chen J H. Mobilization of adsorbed cadmium and lead in aquifer material by bacterial extracellular polymers [J]. Water Research, 1995, **29**(2): 421~ 430.
- [7] Herbert B E, Bertsch P M, Novak J M. Pyrene sorption by water-soluble organic carbon [J]. Environ. Sci. Technol., 1993, **27**(2): 398~ 403.
- [8] Johnson W P, Gary A. Facilitated transport and enhanced desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by natural organic matter in aquifer sediments [J]. Environ. Sci. Technol., 1995, **29**(3): 807~ 817.
- [9] Lafrance P. Effect of natural dissolved organic matter found in groundwater on soil adsorption and transport of pentachlorophenol [J]. Environ. Sci. Technol., 1994, **28**(13): 2314~ 2320.
- [10] Lehman R M, Mills A L. Field evidence for copper mobilization by dissolved organic matter [J]. Water Research, 1994, **28**(12): 2487~ 2497.
- [11] Madrid L, Diaz B E. Mobility of cadmium added to a soil treated with residues [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 1998, **7**(12): 849~ 858.
- [12] Zhou H N, Thompson M L. Copper-binding ability of dissolved organic matter derived from anaerobically digested biosolids [J]. J. Environ. Qual., 1999, **28**(3): 939~ 944.
- [13] Lamy I, Bourgeois S, Bermond A. Soil cadmium mobility as a consequence of sewage sludge disposal [J]. J. Environ. Qual., 1993, **22**: 931~ 937.
- [14] Baham J, Sposito G. Adsorption of dissolved organic carbon extracted from sewage sludge on montmorillonite and kaolinite in the presence of metal ions [J]. J. Environ. Qual., 1994, **23**: 147~ 153.
- [15] Jandl R, Sollins P. Water-extractable soil carbon in relation to the below ground carbon cycle [J]. Biol. Fertil. Soils, 1997, **25**: 196~ 201.
- [16] Zhou L X, Wong J W C. Behavior of heavy metals in soil: Effect of dissolved organic matter [A]. In: Selim M, Kingery W L (eds.) Geochemical and hydrological reactivity of heavy metals in soils [M]. New York: CRC Press LLC, 2003, 245~ 270.
- [17] Zhou L X, Wong J W C. Microbial decomposition of dissolved organic matter derived from organic wastes and its control during sorption experiment [J]. J. Environ. Qual., 2000, **29**: 1852.
- [18] Zhou L X, Zhou S G, Zhan X H. Sorption and biodegradability of sludge bacterial extracellular polymers in soil and their influence on soil Cu behavior [J]. J. Environ. Qual., 2004, **33**(1): 154~ 162.
- [19] McCarthy J F. Mobility of natural organic matter in a sandy aquifer [J]. Environ. Sci. Technol., 1993, **27**(4): 667~ 676.
- [20] 王艮梅, 周立祥. 施用有机物料对污染土壤水溶性有机物和铜活性的动态影响 [J]. 环境科学学报, 2003, **23**(4): 452~ 457.
- [21] Guggenberger G, Glaser B, Zech W. Heavy metal binding by hydrophobic and hydrophilic dissolved organic carbon fractions in a spodosol A and B horizon [J]. Wat. Air and Soil Pollution, 1994, **72**: 111~ 127.
- [22] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter [J]. The Science of the Total Environment, 1998, **209**: 27~ 39.
- [23] Chefetz B, Hadar Y, Chen Y. Dissolved organic carbon fractions formed during composting of municipal solid waste: properties and significance [J]. Acta Hydrochim Hydrobiol., 1998, **26**(3): 172~ 179.