

水溶性有机质对土壤中 污染物环境行为影响的研究进展

徐玉芬, 吴平霄, 党 志

华南理工大学 环境科学与工程学院, 广州 510640

摘 要: 水溶性有机质 (DOM) 作为有机配位体, 含有羧基、羟基、羰基和甲氧基等活性功能团, 可以通过与土壤中的污染物发生离子交换、吸附、络合、螯合、凝聚、氧化还原等一系列反应, 进而影响它们在土壤中的形态、迁移转化和最终归宿。本文概述了 DOM 在土壤中的吸附, 系统总结了近年来国内外关于水溶性有机质对土壤中污染物影响的研究进展, 阐述了水溶性有机质能提高重金属的溶解度及其对重金属、农药、PAHs 吸附解吸、迁移等环境行为所起的作用, 最后指出今后应该进一步研究的问题。

关 键 词: DOM; 污染物; 吸附; 解吸; 迁移

中图分类号: X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2007)03-0307-06

Advances in Research on the Influence of Environmental Behaviors of Pollutants in Soils Caused by Water Dissolvable Organic Matter

XU Yu-fen, WU Ping-xiao, DANG Zhi

College of Environmental Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract: As organic ligands, the water dissolvable organic matters (DOM) contain many active functional groups such as carboxyl, hydroxyl, carbonyl, and methoxyl. They could affect the form, migration, transformation and sedimentation of pollutants in soils through a series of interactions, such as ion exchange, absorption, ligation, chelating, pectisation, oxidation-reduction and so on, between pollutants in soils and them. This paper has briefly described the absorption of DOM in soils, systematically summarized advances in research on the influence of pollutions in soils caused by DOM in recent years, pointed out that DOM could improve the solubility of heavy metals, and could affect the environmental behaviors, such as absorption-desorption and migration, of heavy metals, pesticide and PAHs in soils, and finally raised some questions that should be further studied.

Key words: DOM; pollutants; absorption; desorption; migration

水溶性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是指在室温与天然 pH 条件下土壤中能进入水相的天然有机组分, 是水体环境和陆地系统中比较活跃的化学组分, 过去集中于研究 DOM 在土壤中的组分和功能, 现在认识到 DOM 所含的羧基、羟基、羰基和甲氧基等活性功能团, 可以与土壤、水体、沉积物中的有机和无机物发生络合、螯合、吸附等反

应, 所以研究重点已经转移到 DOM 对污染物在土壤中的吸附、迁移、转化和最终归宿的影响上。

1 DOM 在土壤中的吸附

DOM 在土壤中的吸附主要有以下几种机制: 静电吸附、配位体交换-表面络合作用、疏水作用、熵值效应、氢键作用和阳离子键桥作用等; 在土壤中

收稿日期: 2006-11-06 收到, 2007-03-30 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40573064, 40202007); 广东省自然科学基金资助项目 (06025666, 04020017); 广东省科技计划项目 (2006B36601004); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-06-0747)

第一作者简介: 徐玉芬 (1982—), 女, 硕士研究生, 专业方向: 环境材料、环境修复。

通讯作者: 吴平霄 (1968—), 教授, 从事环境地球化学研究, E-mail: pppxwu@scut.edu.cn.

的吸附与土壤粘粒矿物组成、有机质含量、离子强度和 pH 值有关。研究^[1]显示,DOM 在土壤中的吸附很大程度上表现为它与土壤矿物表面的羟基配位体的交换。粘土含量高会促进 DOM 的吸附,土壤中的有机物则试图抑制 DOM 的吸附,这可能是矿物表面的活性位置的阻塞。DOM 在 pH 值 4~5 时吸附最强,随 pH 的增加而减少,pH 值对 DOM 的影响可以解释为 pH 值会造成 DOM 分子和表面羟基的离子化。Ling 等^[2]发现土壤的粘土成分提供了大量的表面积来吸附 DOM,而土壤有机物质(soil organic matter, SOM)与粘土的络合则会阻塞粘土表面的活性位置,从而抑制了 DOM 的吸附。研究表明,随着土壤溶液中离子强度的增大,土壤对 DOM 吸附量明显减少^[3]。在 pH 值为 3.9 时,DOM 添加到土柱中会被完全吸附;在 pH 值为 6.6 时,50%~60% 的 DOM 被吸附,说明 pH 值的增加会减少土壤对 DOM 的吸附^[4]。Ling 等^[5]发现土壤对 DOM 对最大吸附量(与土壤有机碳含量成反比)的次序为:土壤 2(36 mg DOC/kg) > 土壤 1(29 mg DOC/kg) > 土壤 3(27 mg DOC/kg) (DOC 为水溶性有机碳)。结果显示有机碳含量低的土壤会为 DOM 吸附到矿物表面提供更多的吸附位置,而有机碳含量高的土壤则吸附位置少,DOM 吸附也少。

土壤对 DOM 吸附作用的能力还与 DOM 的来源和性质有关。研究发现,当土壤中无外源 DOM 时,DOM 净释放,其中潮土、红壤分别为 33.58 mg/L 和 17.17 mg/L。潮土中加入外源的绿肥 DOM 为 150 mg/L 时,土壤仍存在 DOM 的净释放,而加入猪粪 DOM 仅为 50 mg/L 时,土壤基本不存在 DOM 的净释放。当加入的 DOM 均为 50 mg/L 时,土壤对 DOM 都存在吸附作用,红壤对外源加入 DOM 的吸附作用明显比潮土对 DOM 的吸附作用强,且同种土壤对猪粪 DOM 的吸附作用大于对绿肥 DOM 的吸附作用。与绿肥 DOM 相比,土壤对猪粪 DOM 的亲和力更强,猪粪 DOM 中的疏水性组分和高分子量的组分较高,通常这些组分易被土壤吸附,而绿肥 DOM 中亲水性组分及小分子组分含量高,土壤与其亲和力小,从而不易被土壤吸附^[6]。

2 DOM 对土壤中重金属环境行为的影响

2.1 DOM 对重金属溶解度的影响

重金属在土壤中的溶解度很低,而含有大量络合/螯合基团的 DOM 能与土壤中的重金属通过络

合和螯合作用,形成有机-金属配合物,促进重金属的溶解。研究发现有 DOM 存在时 Pb^{2+} 的溶解度会提高,是由于可溶 DOM 与 Pb^{2+} 络合阻止 Pb^{2+} 被土壤吸附^[24]。研究显示,土壤中加入含 DOC 较高的牲畜粪便,将使溶解性 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的浓度增加 30%~100%^[7]。具有相似羧基官能团的猪粪 DOM 和土壤中的胡敏酸对 Cu^{2+} 离子的最大结合能力相近,而包含两倍浓度羧基官能团的土壤富里酸的最大结合能力更高^[8]。研究发现土壤 A1 层含碳量更高的挪威云杉下 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶解度很高,是因为这些离子易与 DOC 络合,可溶性腐殖物质如胡敏酸和富里酸在中性和碱性条件下能提高重金属(如 Cu^{2+} 与 Ni^{2+}) 的溶解度,腐殖质中含有多种官能团(如羧基、羟基和氨基),能以各种方式与金属离子络合^[9]。

DOM 的浓度对重金属的溶解也会有影响。金属络合 DOM 在相当程度上会影响金属的溶解度,测量显示和 DOM 的络合能提高溶解的金属浓度两个数量级以上,而 DOM 浓度增加会提高金属的溶解度和移动性^[10]。研究表明,提高土柱或砂柱淋溶液的 DOC 浓度,能提高 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 的溶解性^[11]。DOC 含量增加 300%~400%,可溶性 Cu^{2+} 提高 400%~500%^[12]。

2.2 DOM 对重金属吸附解吸的影响

DOM 可以通过与液相金属离子竞争吸附点位或优先吸附在固体表面上,从而抑制了土壤对重金属的吸附,促进了土壤重金属的解吸。各种 DOM 对重金属吸附的促进或抑制效果不同,可能与土壤和 DOM 的性质、来源有关。研究表明,酸性土壤和石灰土壤中添加来自淤泥和淤泥堆肥中的 DOM 都会减少铜的吸附,但淤泥 DOM 的作用更大,这是由于堆肥 DOM 比淤泥 DOM 的疏水性更强。DOM 的浓度对铜的吸附也有影响,DOM 浓度增高, Cu^{2+} 吸附减少^[13]。陈同斌等^[14]以赤红壤、水稻土和褐土为供试土壤,发现无论添加稻秆 DOM 还是底泥 DOM,都会使 Cd^{2+} 的最大吸附容量和吸附率明显降低 17.3%~93.9%。在添加同一种 DOM 的前提下,DOM 对 Cd^{2+} 吸附的抑制作用均为:赤红壤 > 水稻土 > 褐土。稻秆 DOM 和底泥 DOM 对 Cd^{2+} 吸附的影响和土壤中 pH 值成正比。Shi 等^[15]发现 pH 值 5.5 时在土壤中添加 DOM 会促进 Cu^{2+} 的释放,但对 Zn^{2+} 释放影响很小。

周立祥等^[16]通过吸附实验发现,与没有垃圾渗滤液 DOM 的处理相比,垃圾渗滤液 DOM 能明显促进土壤对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附,原因可能是垃圾渗

滤液 DOM 的 pH 较高,进入土壤后导致土壤悬液 pH 高于未加垃圾渗滤液 DOM 的对照处理,因此提高了土壤对重金属的吸附。另一原因可能是垃圾渗滤液 DOM 与土壤表面作用产生了一种“新的土壤表面”,增加了吸附位点,改变了电荷性质,从而提高了对重金属的吸附,也可能垃圾渗滤液 DOM 作为土壤与金属之间的络合桥梁,增强了固体表面的亲和力,促进土壤的重金属吸附。另有研究表明,富里酸对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 等重金属吸附的影响在 pH 值小于 4.9 时平均提高吸附 7.7%~11.7%,在 pH 值大于或等于 4.9 时,平均提高吸附不到 4.1%。

2.3 DOM 对重金属在土壤中迁移的影响

土壤重金属容易被土壤牢固吸持,活性较低,难于迁移,而 DOM(如富里酸 FA)移动性强,对重金属有较强的络合能力,在污染土壤中充当了助溶剂和载体,有效态重金属含量相对增多,促进了重金属的溶解迁移。室内土柱模拟实验^[17]发现,重金属在潮土中垂直迁移主要是土壤中形成了可溶性金属有机络合物。周立祥等^[18]的土柱淋滤实验表明,垃圾渗滤液 DOM 进入土壤能促进重金属的纵向迁移。

研究发现,料液中没有 DOC 时,4.5~6.0 cm 深度、pH 值为 3.9,大约有 32% 的总铜滤出;pH 值为 6.6,约有 12% 的总铜滤出。而料液中添加 DOC 后,同样在 4.5~6.0 cm 深度,pH 值为 3.9,则有大约 28% 的总铜滤出,pH 值为 6.6,约有 20% 的总铜滤出^[19]。这说明 pH 值较低且没有 DOC 时,Cu 的迁移性更高,而在更高的 pH 值时 Cu 的迁移性增大是由于 DOC 的存在。浸出实验^[15]发现, Cu^{2+} 在未加料土壤中的释放量非常小,但在 pH 值为 5.5 时加入 DOM 能促进 Cu^{2+} 从加料土壤中的释放。DOM 影响金属的释放主要通过:1)形成可溶的金属-DOM 络合物,增加金属移动性。2)DOM 与土壤颗粒的凝结产生更高土壤粘合能和降低 Cu 的移动性。研究表明,DOM 不能阻止淤泥中释放的 Zn^{2+} 在土柱内被土壤固相吸附,而在淤泥修复的土壤中 DOM-Ni 的络合在 Ni^{2+} 的淋溶中非常重要,尚未发现 DOM 和 Cu 间的牢固结合,对 Cu^{2+} 的迁移也起了重要作用^[20]。Strobel 等^[21]在 pH 值为 5 以上的溶液中加入 DOC,提高了铜的释放速率,而在 pH 为 3.8~5 的溶液中加入 DOC 则会抑制铜的释放。

重金属在土壤中的迁移还与 DOM 的浓度和种类有关。Gerritse^[22]发现,随着 DOM 的增加,镉的迁移性增强。对湿地中重金属的迁移能力与 DOM 的相关分析表明, Hg^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Cu^{2+} 和 As^{3+} 的迁移

能力与 DOM 浓度呈正相关,而 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 与 DOM 浓度相关性不显著^[23]。由于 DOM 的吸附速率限制和/或 DOM 组分的竞争吸附, Pb^{2+} 的迁移明显提高,泥炭胡敏酸和泥炭富里酸存在的情况下 Pb^{2+} 的迁移能力提高了,泥炭胡敏酸对 Pb^{2+} 迁移能力提高的程度更大^[24]。研究表明,在酸性或中性时,富里酸对 Cu^{2+} 迁移的促进作用比胡敏酸强,如每千克土壤添加 1 g 富里酸,pH 为 7 时,大约有 2% 的 Cu^{2+} 滤出,pH 值为 11 时,大约有 11% 的 Cu^{2+} 滤出;而每千克土壤添加 1 g 胡敏酸,在 pH 值为 7 时,有不到 1% 的 Cu^{2+} 滤出,pH 值 11 时,不到 11% 的 Cu^{2+} 滤出^[25]。

3 DOM 对土壤中有机污染物环境行为的影响

3.1 DOM 对农药在土壤中行为的影响

3.1.1 对农药在土壤中吸附解吸的影响 农药在环境中的物理行为在很大程度上取决于它的吸附解吸能力。研究表明,DOM 能通过溶液稳定的相互作用或和农药分子竞争土壤表面的吸附位置减少土壤对农药的吸附增加解吸。Céspedes 等^[26]研究两种不同的 DOM 可溶性天然有机质和丹宁酸对吡虫啉吸附的影响,发现有丹宁酸时,吡虫啉吸附减少程度比有可溶性天然有机物时大,可以认为丹宁酸有较高的表面酸度,比溶解性天然有机质更能竞争吸附位置,而溶解性天然有机质分子浓度增加,吸附的吡虫啉浓度增加,可以解释为当溶解性天然有机质浓度增加有不同极性的更高量的分子混合被吸附在土壤表面,产生额外的位置吸附吡虫林分子。研究显示,把从有机肥提取的 DOM 施入草皮,会减少土壤对毒死蜱、敌草胺和 2,4-D 的吸附,这些结果与 DOM 对其他有机化合物的负效应的研究一致,DOM 和有机化合物络合或有机化合物竞争吸附位置,此外吸附减少可能与由于表面张力减少 DOM 促进溶解有关^[27]。然而,也有人^[28]认为,有 DOM 时,土壤对阿特拉津、异丙隆和百草枯的吸附影响很小或没有影响。有人^[29]指出 DOM(达到每升 150 mg 水溶性有机碳)不会明显抑制土壤对阿特拉津或扑草净的吸附。

DOM 对农药吸附解吸的影响还与农药自身的性质及 DOM 的浓度有关。有人^[30]报道过土壤中 DOM 可使溶解度较小的农药丁恶隆、阿特拉津的吸附容量增加,而使溶解度较大的农药长杀草在土壤中的吸附容量降低。其原因一方面是 DOM 在土壤表面的吸附增加了土壤有机碳含量,增加了使土

壤表面的吸附点位,农药的吸附容量也随之增加;另一方面,DOM 与水溶性较高的农药极性基团在土壤表面有竞争吸附,降低了农药在土壤中的吸附容量。研究表明,平衡溶液中阿特拉津的吸收和 DOM 的浓度密切相关,DOM 浓度的降低促进了土壤对阿特拉津的吸附,而 DOM 浓度增高则发生抑制。DOM 对阿特拉津吸附的影响可以认为是累积吸附和阿特拉津与 DOM 结合的共同影响^[5]。吸附实验证明随着 DOM 浓度的增加,土壤对毒死蜱、萘和 2,4-D 的吸附容量显著下降,吸附减少可能是由于 DOM 对土壤表面的吸附位置的竞争或是 DOM 和有机化学品络合,也有可能是由于表面张力的减少,DOM 提高了它们的溶解度^[31]。Celis 等^[32]报道了发生在土壤/溶液界面的过程,如 DOM 对土壤表面吸附位置的竞争,减少土壤对阿特拉津的吸附是重要的。然而,土壤对 DOM 的吸附可能会创造额外的位置来吸附农药分子,DOC 浓度增大吸附增多,DOM 能促进阿特拉津从土壤中解吸。DOM 中不同的组分对吸附解吸有不同的影响。发现 DOM 的疏水部分吸附到土壤中能促进土壤对阿特拉津的吸附,而亲水部分加入到土壤/水系统中会导致阿特拉津吸附的减少。在 DOM 浓度相对较低时,疏水部分减少阿特拉津吸附的影响更强;反之,则亲水部分会增加阿特拉津的吸附^[5]。

3.1.2 对农药在土壤中迁移的影响 DOM 能促进草萘胺在土壤中的迁移^[33]。在整个淋滤过程中,不同处理的土壤中迁移出土体的草萘胺总量次序为:绿肥 DOM 处理组 > 污泥 DOM 处理组 > 对照组。前两种处理可使黄棕壤中迁移出土体的草萘胺总量分别提高 73.42 % 和 26.87 %,而使潮土中迁移出土体的草萘胺总量增加 43.54 % 和 28.29 %。敌草胺和 DOM 的结合不是完全可逆的,增加 DOM 就提高了敌草胺在土壤中迁移的可能性^[34]。Céspedes 等^[26]的实验发现,溶液中存在商业煤提取的 DOM,或高纯度的丹宁酸中提取的 DOM,吡虫林的迁移分别增加 21.4 % 和 11.0 %。Williams 等^[35]采用透析平衡法确定淋溶液中有 17 % ~ 56 % 的敌草胺停留在 500 道尔顿的渗析膜里,小部分敌草胺的快速淋溶是由于 DOM 促进迁移的结果。来自污泥的 DOM 促进了敌草胺的迁移,来自污泥土壤的敌草胺的淋溶速率是没有污泥土壤的两倍^[36]。研究表明,毒死蜱在淋溶液中最大浓度从 0.11 ~ 到 0.16 mg/L 增加了大约 45 %,显示 DOM 增加了毒死蜱在 USGA (美国高尔夫球协会) 砂柱中的迁移^[27]。一些杀虫剂与 DOM 形成络合物后,移动性增大,使

DOM 增加了农药在土壤中的活化迁移^[37]。DOM 促进了草萘胺向土壤深层迁移^[38]。

3.2 DOM 对(多环芳烃) PAHs 在土壤中行为的影响

3.2.1 DOM 对 PAHs 在土壤中吸附解吸的影响

Gao 等^[39]发现,土壤本身的 DOM 会抑制菲的吸收,外加 DOM 对菲吸附的影响与 DOM 的浓度有关,菲的吸附随外加 DOM 浓度 (0 ~ 106 mg DOC/L) 增加而减少,而在外加 DOM 浓度较低 (≤ 28 mg DOC/L) 时,菲的表观分配系数值 (K_d^*) 比控制土壤分配系数值 (K_d) 大 14.7 % ~ 48.4 %,而外加 DOM 浓度更高 (≥ 52 mg/L) 时,则会抑制土壤固相对菲的吸附。内外 DOM 对菲吸附的影响机制主要是“累积吸附”,溶液中菲和 DOM 的结合,以及因 DOM 粘附于土壤固相表面特征的变化。Gao 等^[40]发现洗提土壤对菲的吸附是对照土壤的 1.23 倍,而洗提土壤中有没有重金属都不会影响菲的吸附,说明平衡液中的 DOM 能抑制测试土壤对菲的吸附。Kgel-Knabner 等^[41]发现 200 mg/L 的 DOM (以 C 计算) 可使苯并芘从土壤中解吸率提高了 25 倍。

试验发现,猪粪和猪粪堆肥的 DOM 使菲的解吸分别由 11.6 % 上升到 15 % 和 13.7 % 上升到 16.5 %,芘的解吸分别由 4.6 % 上升到 10.8 % 和 6.1 % 上升到 12.1 %,可能是 DOM 和吸附到土壤中的 PAHs 的相互作用形成了 DOM - PAH 络合促进了它的解吸,并且大于 25000 道尔顿的 DOM 组分比小于 1000 道尔顿的低分子组分和 PAHs 有更强的相互作用,更能促进 PAHs 从土壤中解吸^[42]。

3.2.2 水溶性有机物对 PAHs 在土壤中迁移的影响 DOM 因含有亲水性和疏水性馏分,在功能、结构和表面活性剂相似,能提高 PAHs 的水溶性,促进 PAH 在土壤-水系统的迁移。Kim 等^[43]发现当水溶性胡敏酸在 0 mg/L 时,菲和芘的滤去浓度为 0.121 和 0.0271 g/mL,而当水溶性胡敏酸为 126.2 mg/L 时,菲和芘显著上升到 1.2111 g/mL 和 0.3131 g/mL,胡敏酸浓度越高,疏水有机物的可滤去性越高(菲 $R^2 = 0.97$,芘 $R^2 = 0.96$)。Sabbah^[44]研究发现,10 mg/L 胡敏酸对菲的迁移影响很小,只有在 30 mg/L 时才能看到显著的影响,停滞系数从 12.6 下降到 9.1。而疏水性更强的荧蒽在 8 mg/L 胡敏酸时就能看到显著的穿透提高,停滞系数从 49.7 下降到 33。PAHs 的淋溶行为取决于土壤中 DOM 的浓度和含量^[45]。土壤不饱和层中菲的迁移很大程度上受到施入的 DOM 浓度变化的影响,提高 DOM 浓度会促进总 PAH 的迁移,降低 DOM 浓度则会遏制迁移。

4 结 语

DOM 对环境主要污染物环境行为的影响,特别是对污染物在土壤中的吸附、迁移、转化和溶解的影响,已成为土壤、环境和生态科学领域关注的焦点和热点。但 DOM 对重金属、有机物污染物环境影响的程度和机制,以及与污染物的相互作用和结合方式的研究较少。深入研究这些问题,对于评估环境风险、预防土壤污染和修复污染的土壤具有重大意义。

参考文献 (References):

- [1] Shen Y H. Sorption of natural dissolved organic matter on Soil [J]. *Chemosphere*, 1999, 38:1505 - 1515.
- [2] Ling W T, Xu J M, Gao Y Z. Dissolved organic matter enhances the sorption of atrazine by soil [J]. *Biol. Fertil. Soils*, 2006, 10:1007 - 1014.
- [3] Davis A D. Adsorption of natural dissolved organic matter at the oxide/ water interface [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, 46:2381 - 2393.
- [4] Temminghof E J M, van der Zee, S E A T M, de Haan, F A M. Copper mobility in a copper contaminated sandy soil as affected by pH, and solid and dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(4):1109 - 1115.
- [5] Ling W T, Wang H Z, Xu J M, Gao Y Z. Sorption of dissolved organic matter and its effects on the atrazine sorption on soils [J]. *J. Environ. Sci.*, 2005, 17(3):478 - 482.
- [6] 王艮梅, 周立祥, 黄焕忠. 水溶性有机物在土壤中的吸附及对 Cu 沉淀的抑制作用[J]. *环境科学学报*, 2006, 27(4):1 - 6.
Wang Genmei, Zhou Lixiang, Huang Huanzhong. Adsorption of dissolved organic matter in soil and dissolved organic matter effect on the copper precipitation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 27(4):1 - 6. (in Chinese with English abstract)
- [7] Castilho R, Chardon W J, Oenema O, Vriesema. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries [J]. *J. Environ.*, 1997, 26:372 - 378.
- [8] Businelli M, Altieri R, Giusquiani P L, Gagliotti G. Complexation capacity of dissolved organic matter from pig slurry: A gel filtration and dialysis study [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 113:385 - 394.
- [9] Andersen M K, Raulund-Rasmussen K, Strobel B W, Hansen H C B. The effects of tree species and site on the solubility of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in soils [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, 00:1 - 14.
- [10] Weng L P, Erwin J M, Temminghoff, Stephenlofts, Edwardtipping, Willem H, Riemsdijk V. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2002, 36(22):4804 - 4810.
- [11] Dunnivant F M, Jardine P M. Transport of naturally occurring dissolved organic carbon in laboratory columns containing aquifer material [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1992, 56:437 - 441.
- [12] Sebastien S, McBribe B, Norvel W A, et al. Copper solubility and speciation of in situ contamination soils: Effects of copper level, pH and organic matter [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, 100:133 - 140.
- [13] Zhou L X, Wong J W C. Effect of dissolved organic matter from sludge and sludge compost on soil copper sorption [J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30:878 - 883.
- [14] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2):183 - 186.
Chen Tongbin, Chen Zhijun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):183 - 186. (in Chinese with English abstract)
- [15] Shi Z Q, Dominic M D I Torod, Herbert E Allen, Alexander A Ponizovsky. Modeling kinetics of Cu and Zn release from soils [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, 39(12):4562 - 4568.
- [16] 付美云, 周立祥. 垃圾渗滤液水溶性有机物对土壤吸附重金属 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的影响 [J]. *环境科学学报*, 2006, 29(5):828 - 834.
Fu Meiyun, Zhou Lixiang. Effect of sorption heavy metal Cd^{2+} , Pb^{2+} onto soils with dissolved organic matter of landfill-leachate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 29(5):828 - 834. (in Chinese with English abstract)
- [17] Kaschl A, Romheld V, Chen Y. The influence of soluble organic matter from municipal solid waste compost on trace metal leaching in calcareous soils [J]. *Sci. Total Environ.*, 2002, 291:45 - 57.
- [18] 付美云, 周立祥. 垃圾渗滤液水溶性有机物对污染土壤中重金属 Pb 迁移性的影响 [J]. *东华理工学院学报*, 2006, 29(2):172 - 175.
Fu Meiyun, Zhou Lixiang. Translocation of lead in contaminated soils facilitated by dissolved organic matter of landfill-leachate [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2006, 29(2):172 - 175. (in Chinese with English abstract)
- [19] Temminghoff E J M, et al. Copper mobility in a copper-contaminated sandy soil as affected by pH and solid and dissolved organic matter [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1997, 31(4):1109 - 1115.
- [20] Ashwortha D J, Alloway B J. Soil mobility of sewage sludge-derived dissolved organic matter, copper, nickel and zinc [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127:137 - 144.
- [21] Bjarne W S, Hans C B H, Borggaard Ole K, Andersen Martin K, Raulund-Rasmussen K. Cadmium and copper release kinetics in relation to afforestation of cultivated soil [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65(8):1233 - 1242.
- [22] Gerritse R G. Column and catchment scale transport of cadmium: Effect of dissolved organic matter [J]. *J. Contam. Hydrol.*, 1996, 22:145 - 163.
- [23] Kalbitz K, Wennich R. Mobilization of heavy metal and in polluted wetland soil and its dependence on dissolved organic matter [J]. *Sci. Total Environ.*, 1998, 209:27 - 39.
- [24] Ryan N. Jordan, David R Y, Wade E H. Enhanced mobility of

- Pb in the presence of dissolved natural organic matter [J]. *J. Contam Hydr.* 1996,29:59 - 80.
- [25] Wu J, West L J, Stewart D I. Effect of Humic Substances on Cu (II) solubility in Kaolin-Sand soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 94(3): 223 - 238.
- [26] Flores-Ce 'spedes F, Ferna 'ndez-Pe 'rez M, Villafranca-Sa 'nchez M, Gonza 'lez-Pradas E. Cosorption study of organic pollutants and dissolved organic matter in a soil [J]. *J. Environ. Poll.* ,2006,142:449 - 456.
- [27] Xing B S. Potential movement of pesticides related with dissolved organic matter from organic fertilizer application on turf [M]. Massachusetts: Water Resources Research Center Publication, 2006:180.
- [28] Spark K M, Swift R S. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption [J]. *Sci. Total Environ.* , 2002, 298:147 - 161.
- [29] Seol Y K, Lee L S. Effect of dissolved organic matter in treated effluents on sorption of atrazine and prometryn by soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* ,2000,64:1976 - 1983.
- [30] Barriuso E, Baer U, Caivet R. Dissolved organic matters and adsorption-desorption of dimefuron, atrazine and carbetamide by soils [J]. *J. Environ. Qual.* ,1992,21:359 - 367.
- [31] Li K, Xing B S, William A. Torelloa. Effect of organic fertilizers derived dissolved organic matter on pesticide sorption and leaching [J]. *J. Environ. Poll.* ,2005,134:187 - 194.
- [32] Celis R, Barriuso E, Houot S. Effect of liquid sewage sludge addition on atrazine sorption and desorption by soil [J]. *Chemosphe*, 1998, 37(6): 1091 - 1107.
- [33] 马爱军, 周立祥, 何任红. 水溶性有机物对草萘胺在土壤中吸附与迁移的影响 [J]. *环境科学学报*, 2006, 27(2): 356 - 360. Ma Aijun, Zhou Lixiang, He Renhong. Effects of dissolved organic matter on napropamide adsorption and transport in soil system [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 356 - 360.
- [34] Lee D Y, Farmer J. Dissolved organic matter interaction with napropamide and four other nonionic pesticides [J]. *J. Environ. Qual.* ,1989,18:468 - 474.
- [35] Williams C F, Agassi M, Letey J, Farmer W J, Nelson S D, Ben-Hur M. Facilitated transport of napropamide by dissolved organic matter through soil columns [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 2000, 64:590 - 594.
- [36] Nelson S D, Letey J, Farmer W J, Williams C F, Ben-Hur M. Facilitated transport of napropamide by dissolved organic matter in sewage sludge [J]. *J. Environ. Qual.* ,1998,27:1194 - 1200.
- [37] Madhum YA, Yong J L, Freed V H. Binding of herbicides by water soluble organic materials from soil [J]. *J. Environ. Qual.* , 1986, 15:64 - 68.
- [38] Nelson S D, *et al.* . Stability and mobility of napropamide complexed with dissolved organic matter in soil column [J]. *J. Environ. Qual.* ,2000,29:1856 - 1862.
- [39] Gao Yanzheng, Xiong Wei, Ling Wanting, Wang Xiaorong, Li Qiuling. Impact of exotic and inherent dissolved organic matter on sorption of phenanthrene by soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 53:5766 - 5772.
- [40] Gao Y Z, Xiong W, Ling W T, Xu J M. Sorption of phenanthrene by soils contaminated with heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2006, 45:6535 - 6541.
- [41] Gel-Knabner K I, Totsche K U, Raber B, *et al.* . Desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil in the presence of dissolved organic matter: Effect of solution composition and aging [J]. *J. Environ. Qual.* ,2000,29:906 - 916.
- [42] Cheng K Y, Wong J W C. Combined effect of nonionic surfactant Tween 80 and DOM on the behaviors of PAHs in soil-water system [J]. *Chemosphere*, 2006, 62:1907 - 1916.
- [43] Yong-Jin K, Masahiro O. Leaching characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from spiked sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2003, 51:387 - 395.
- [44] Isam S, Menahem R, Zev G. An independent prediction of the effect of dissolved organic matter on the transport of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *J. Contam. Hydr.* ,2004,75:55 - 70.
- [45] Busche U, Hirner A V. Mobilization potential of hydrophobic organic compounds (HOCs) in contaminated soils and waste materials. Part II: Mobilization potential of PAH, PCBs and phenols by natural waters [J]. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* , 1997, 25:248 - 252.
- [46] Weigand H, Totsche K U, Kogel-Knabner I. Effect of fluctuating input of dissolved organic matter on long-term mobility of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils [J]. *Phys. Chem. Earth*, 1998, 23(2): 211 - 244.