

李 旭,许 梦,陶佳慧,等. 黑土对 DOM 的吸附作用及其影响因素[J]. 江苏农业科学,2015,43(8):366-369.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.08.119

黑土对 DOM 的吸附作用及其影响因素

李 旭¹,许 梦¹,陶佳慧¹,丁鸿弼^{1,2},李琳慧¹,于济通¹,郭 平¹

(1. 吉林大学环境与资源学院/地下水资源与环境教育部重点实验室,吉林长春 130012;
2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定 071051)

摘要:采用批量平衡法研究了东北典型黑土对 DOM 吸附的动力学和热力学特征及其影响因素(离子强度和温度)。结果表明:黑土对 DOM 的动力学吸附过程包括快速吸附和慢速吸附 2 个阶段,而且很好地被准二级动力学方程拟合。Langmuir 方程能够较为准确地描述黑土对 DOM 的热力学吸附过程。随着离子强度的增加,DOM 在黑土上的吸附量逐渐增加,并且不同离子强度下黑土对 DOM 的吸附机制并没有改变。同一温度下,DOM 吸附量随着平衡浓度的增加而增加。黑土对 DOM 的吸附过程为放热熵减反应,属焓减控制过程。黑土对 DOM 吸附以化学吸附为主,主要通过化学键起作用。

关键词:黑土;水溶性有机质(DOM);吸附;影响因素

中图分类号:X132 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)08-0366-04

水溶性有机物(DOM)是土壤生态系统中的一种重要的活性组分^[1],是由不同结构和分子量有机物组成的复合物^[2]。DOM 的物质组成和化学结构不仅使其能够参与土壤多种反应,影响有机无机污染物的环境行为,而且还影响土壤污染的修复与控制过程^[3]。

近年来土壤污染日益恶化,土壤污染治理已经成为当前的首要问题。DOM 对土壤污染物环境行为及其修复和控制的影响与 DOM 自身环境行为密切相关,尤其是 DOM 的吸附作用^[4-6]。目前,国内外学者已经开展了土壤对 DOM 吸附作用方面的一些研究工作。杨佳波等采用经鸡粪堆肥后提取的 DOM 研究了普通肥熟旱耕人为土(黑土母质发育)、石灰肥熟旱耕人为土(褐土母质发育)和酸性肥熟旱耕人为土对 DOM 的吸附,并探讨了土壤理化性质与 DOM 吸附行为的相互关系^[7]。康露等以蜉金龟堆肥牛粪为研究对象提取 DOM,研究了不同 pH 值、离子强度、DOM 质量浓度和反应时间条件下,黑土、白浆土对 DOM 的吸附作用^[8]。Shen 研究了土壤有机物质、黏粒含量、pH 值和离子强度等因素对土壤 DOM 吸附的影响^[9]。Pengerud 等研究了高纬度地区灰壤对土壤 DOM 的吸附,并研究了非晶相铁铝氧化物含量和有机质对土壤吸附 DOM 的影响^[10]。郭平等研究了黑土对经过冻融处理的秸秆和污泥 DOM 的吸附作用及其与 pH 值、离子强度和离子类型之间的关系^[11]。通过文献调研发现,目前还没有人研究黑土对来源于腐熟牛粪 DOM 的吸附行为及其影响因素。虽然有人研究了黑土对 DOM 的吸附作用及其影响因素,但是这些研究中的 DOM 主要来源于秸秆、污泥和经过蜉金龟堆肥

处理的牛粪。这些研究结果能够为研究黑土吸附来源于腐熟牛粪的 DOM 提供借鉴意义,但是这些研究成果并不能代替来源于腐熟牛粪的 DOM 在黑土上的吸附规律,因为土壤对 DOM 的吸附作用受土壤性质、试验操作条件以及 DOM 的性质和物质组成密切相关^[12]。DOM 来源不同,其性质、物质组成和结构差别很大。本研究以黑土为对象,研究其对来源于腐熟牛粪的 DOM 的吸附热力学和动力学过程,同时探讨了离子强度和温度对 DOM 吸附作用的影响因素,以为进一步研究土壤对 DOM 的吸附行为和影响因素等提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自吉林大学南区校园的 0~20 cm 表层黑土。土壤经自然风干,去除石块、枯枝落叶等杂物,磨细后过 2 mm 筛,保存备用。采用鲁如坤的土壤农业化学分析方法^[13]测定供试土壤基本理化性质,结果见表 1。牛粪采集自长春市皓月集团,经自然风干、粉碎后过 2 mm 筛,备用。

表 1 黑土的基本理化性质

| 土壤 | pH 值 | 有机质 (g/kg) | 游离 氧化铁 (g/kg) | CEC (cmol/kg) | Eh (mV) | EC (mS/cm) |
|----|-----------|---------------|---------------------|------------------|------------|---------------|
| 黑土 | 6.80±0.03 | 20.50 | 14.69 | 30.78 | 259±5 | 0.43±0.03 |

注:CEC 指阳离子交换量;Eh 指氧化还原电位;EC 指电导率。

1.2 样品制备

无菌土壤制备:无菌土壤的制备采用张辉等的方法^[14]。DOM 提取和制备:称取适量腐熟牛粪,按照 1 g:10 mL 比例与无菌 NaCl(0.01 mol/L)溶液混合后,将其放在振荡箱中(振荡速度为 180 r/min,培养温度 25℃)振荡培养 24 h。然后,将混合液于高速离心机上 8 000 r/min 离心 20 min,再将上清液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤,制得 DOM 溶液,将其置于 5℃冰箱中低温保存,备用。

采用占新华等的方法^[15]分离 DOM 亲水组分和疏水组

收稿日期:2014-11-03
基金项目:国家自然科学基金(编号:40971248);国家水治理专项(编号:2012ZX07202-009)。
作者简介:李 旭(1990—),男,吉林长春人,硕士研究生,从事环境化学研究。E-mail:416930184@qq.com。
通信作者:郭 平,博士,教授,硕士生导师,从事环境污染防治与生物修复研究。E-mail:guoping@jlu.edu.cn。

分。采用 pH 计直接测定 DOM 的 pH 值,采用 TOC 仪测定总有机碳含量。DOM 基本性质:TOC 2 000 mg/L, pH 值 7.62, 亲水组分 54.46%, 疏水组分 45.54%。

1.3 吸附试验

采用批次试验方法研究土壤对 DOM 吸附动力学过程、吸附热力学及其影响因素。

1.3.1 吸附动力学试验 分别称取 0.1 g 灭菌黑土于一系列 50 mL 离心管中,加入 25 mL 质量浓度为 500 mg/L 的 DOM 溶液至离心管中,然后在 25 °C 下以 170 r/min 避光振荡,分别在 1/12、1/6、1/3、1/2、1、2、4、6、8、12、16、24、32、48 h 将离心管取出,在 3 800 r/min 下离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后,测定滤液中 TOC 的浓度。

1.3.2 吸附热力学及影响因素试验 (1) 热力学试验:称取 0.1 g 灭菌黑土于一系列 50 mL 离心管中,加入 25 mL 质量浓度分别为 125、250、500、1 000、2 000 mg/L 的 DOM 溶液。然后在 25 °C 下以 170 r/min 避光振荡 24 h 后取出,在 3 800 r/min 下离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后,测定滤液中 TOC 的浓度。(2) 影响因素试验:利用质量浓度为 500 mg/L 的 DOM 溶液研究吸附体系温度和离子强度对黑土吸附 DOM 的影响。其中温度设为 15、25、35 °C;离子强度设为 0.001、0.01、0.1、1 mol/L NaCl。

1.4 动力学和热力学模型与热力学参数

1.4.1 动力学模型 准二级吸附动力学模型经积分、整理可得线性形式^[16]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (1)$$

式中: t 是吸附时间, h; k_2 是准二级吸附速率常数, $g/(mg \cdot h)$; q_e 对应于平衡浓度时的吸附量, mg/kg。

1.4.2 热力学模型 Langmuir 方程线性形式:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{\max}} + \frac{1}{Q_{\max} \times b} \times \frac{1}{C_e} \quad (2)$$

Freundlich 方程线性形式:

$$Q_e = K_f C_e^n \quad (3)$$

式中: C_e 为吸附平衡时 DOM 的浓度, mg/L; Q_e 为平衡浓度 C_e 时 DOM 的吸附量, mg/kg; Q_{\max} 为饱和吸附量, mg/kg; b 为吸附亲和常数; K_f 和 n 为常数, n 值作为土壤对吸附质吸附作用的强度指标。

1.4.3 热力学参数 根据 Adhikari 和 Singh 简化的公式计算吸附热力学平衡常数(K)^[17]:

$$K = C_s / C_e \quad (4)$$

式中: C_s 为与吸附面接触的吸附态 DOM 浓度 (mg/L), C_e 为平衡溶液中 DOM 浓度 (mg/L)。

热力学参数计算:

$$\Delta G = -RT \ln K; \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得:

$$\ln K = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (7)$$

式中: ΔG 为标准自由能变, 当 $\Delta G > 0$ 时, 反应不能自发进行; 当 $\Delta G = 0$ 时, 反应可逆; 当 $\Delta G < 0$ 时, 反应以不可逆方式自发进行; ΔH 为标准焓变; ΔS 为标准熵变; T 代表开氏温度; R 为

气体常数。

2 结果与分析

2.1 DOM 的吸附动力学

由黑土对 DOM 的吸附动力学过程和准二级动力学方程拟合曲线(图 1)可知, 在本研究设定的时间范围内, 黑土对 DOM 的吸附动力学过程包括快速吸附和慢速吸附 2 个阶段, 并且在 24 h 达到吸附平衡。快速吸附阶段历时 8 h 左右, 此时吸附率达到平衡吸附量的 84.51%; 慢速阶段历时 16 h 左右, 吸附率为平衡吸附量的 14.46%。杨佳波等研究 3 种土壤(普通肥熟旱耕人为土、石灰肥熟旱耕人为土和酸性肥熟旱耕人为土)对 DOM 吸附量与时间的关系时, 发现这 3 种土壤对 DOM 的吸附也分为快速吸附和慢速吸附 2 个阶段, 土壤对 DOM 的吸附曲线在前 30 min 内呈直线增长的趋势, 此后吸附量随着时间的延长增长缓慢, 1 h 左右达到吸附平衡^[7]。由此可见, 土壤对 DOM 吸附的动力学过程均包括快速和慢速 2 个阶段, 但是黑土与杨佳波研究的 3 种土壤达到吸附平衡的时间不同, 这表明土壤对 DOM 的吸附与土壤类型有关, 不同类型土壤性质差别很大。

由图 1 可知, 黑土对 DOM 的吸附动力学过程可以很好地与准二级动力学方程进行拟合($P < 0.001$)。由此可见, 黑土吸附 DOM 的过程主要是化学吸附。

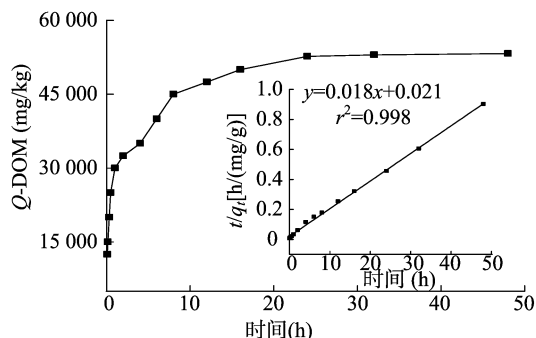


图1 黑土对DOM的吸附动力学和准二级动力学方程拟合曲线

2.2 DOM 的吸附热力学

由黑土对 DOM 吸附的热力学曲线(图 2)可知, 随着 DOM 平衡浓度的增加, DOM 在黑土上的吸附量也随之增加, 并且逐渐趋于平缓。这是因为定量黑土对 DOM 的吸附位是有限的, 当 DOM 平衡浓度较低时, 黑土对 DOM 的吸附位相对较多, 所以随着 DOM 平衡浓度的增加, 黑土对 DOM 的吸附量逐渐增大; 随着 DOM 平衡浓度的升高, 黑土上吸附 DOM 的量逐渐增加, 对 DOM 的吸附位随之减少, 引起黑土对 DOM 的吸附量下降。康露等研究表明, 黑土与带负电荷的 DOM 间存在静电排斥力^[8]。黑土表面带有大量的负电荷^[18-19], DOM 本身也带有负电荷^[8]。随着 DOM 平衡浓度的增加, 黑土表面负电荷与 DOM 负电荷之间静电斥力增强, 降低了黑土对 DOM 的吸附作用。此外, 被吸附在黑土表面的带负电的 DOM 与吸附体系溶液中带负电的 DOM 同样会产生静电斥力, 也抑制了黑土对 DOM 的吸附作用。所以随着平衡吸附量的增加, 黑土对 DOM 的吸附量逐渐趋于平缓。

采用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程对黑土吸附 DOM 的热力学过程进行拟合, 拟合方程分别为 $Q = 1\,087C_e / (1 +$

0.014C_e) 和 $Q = 6\,274C_e^{0.05}$ 。黑土对 DOM 吸附的热力学过程与 Freundlich 方程和 Langmuir 方程之间的相关系数分别为 $R = 0.781$ 和 $R = 0.957$ 。通过相关系数检验发现,黑土对 DOM 吸附的热力学过程与 Langmuir 方程之间的拟合程度达到 0.05 水平的相关性 ($R_{0.05} = 0.878 < R = 0.957$)。由此可见,采用 Langmuir 方程能很好地拟合黑土对 DOM 的吸附热力学过程。由此可见,在本研究试验平衡浓度范围内,黑土对 DOM 的吸附属于单分子层吸附。

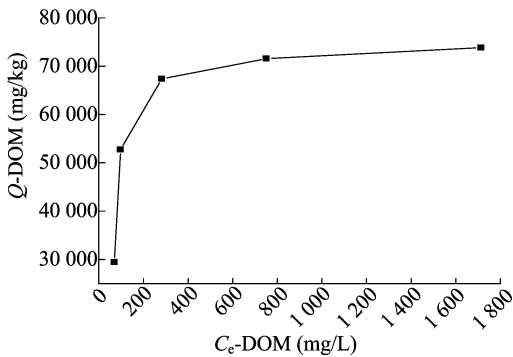


图2 DOM在黑土上的吸附热力学曲线

2.3 影响因素

2.3.1 离子强度对 DOM 吸附热力学的影响 图 3 所示为不同离子强度对黑土吸附 DOM 的影响。不同离子强度条件下,DOM 在黑土上的吸附量随离子强度的增加而增加。研究表明,DOM 分子上的负电荷和矿物质表面所带负电荷因离子强度的增大而被隔离,使 DOM 分子与矿物质表面之间的静电斥力减小,而且离子强度增大,DOM 分子之间的负电荷被隔离,使 DOM 分子之间的静电斥力减小,从而形成利于吸附的大分子量的 DOM^[3]。本试验结果与 Shen 的研究结果^[9]一致。Shen 认为当离子强度较大时,黑土和 DOM 表面的负电荷均被屏蔽,因此,在黑土吸附 DOM 时会产生较小的排斥力,导致吸附量较大。同时,黑土与 DOM 间的排斥力减小使其相互吸附并缠绕而形成无规则团状,表面积增加,导致更多的 DOM 被吸附。随着离子强度减小,DOM 和黑土表面的负电荷屏蔽减小,黑土和 DOM 间的排斥力增加,使黑土与 DOM 间的缠绕逐渐展开成线状,因此吸附下降。

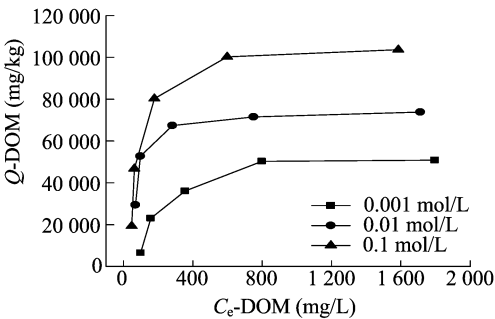


图3 不同离子强度对黑土吸附DOM的影响

将不同离子强度下黑土对 DOM 吸附热力学过程与吸附热力学方程进行拟合,拟合曲线和参数见图 4 和表 3。通过拟合结果的显著性检验 ($R = 0.878 > R_{0.05}$) 发现,Langmuir 方程均能很好地拟合不同离子强度下黑土对 DOM 的吸附热力学过程。由表 2 可知,随着离子强度的增加,DOM 在黑土上的饱和吸附量 (Q_{max}) 逐渐增加。当离子强度由 0.001 mol/L

增加至 0.01 mol/L 时,DOM 在黑土上的饱和吸附量增加了 23.06%;当离子强度由 0.01 mol/L 增加至 0.1 mol/L 时,DOM 的饱和吸附量增加了 46.23%。 b 值随着离子强度的增加呈先增后降的变化。这表明黑土对 DOM 的吸附亲和力受离子强度影响复杂,当离子强度为 0.01 mol/L 时,土壤对 DOM 的吸附亲和力达到最大值。

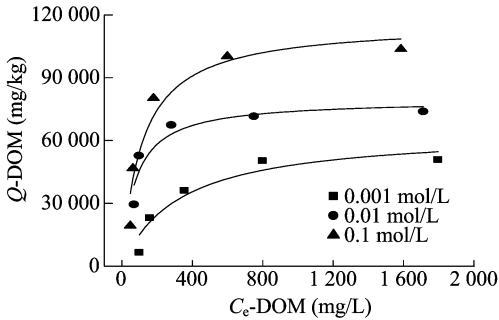


图4 不同离子强度下黑土吸附 DOM 的 Langmuir 等温拟合曲线

表 2 DOM 在黑土上吸附热力学的 Langmuir 等温方程拟合参数

| 条件 | Q_{max} (mg/kg) | b (L/kg) | R |
|-------------------|----------------------|---------------|-------|
| 0.001 mol/L | 64 577.885 | 0.003 06 | 0.944 |
| 0.01 mol/L (25 ℃) | 79 470.472 | 0.013 67 | 0.916 |
| 0.1 mol/L | 116 208.586 | 0.008 95 | 0.952 |
| 15 ℃ | 108 907.271 | 0.008 46 | 0.924 |
| 25 ℃ | 79 470.474 | 0.004 78 | 0.955 |
| 35 ℃ | 54 816.461 | 0.002 43 | 0.943 |

由不同离子强度下吸附平衡时 DOM 的紫外可见吸光度曲线(图 5)可知,随着波长的增加,不同离子强度下的 DOM 吸光度都呈现相同的变化规律,先急剧下降,后趋于平缓。离子强度越大,DOM 的吸光度越小,这与离子强度促进 DOM 的吸附规律是一致的。此外,在不同离子强度下,黑土吸附 DOM 后平衡溶液的紫外可见吸光度曲线形状一致。由此可见,离子强度并没有改变黑土吸附 DOM 的机制。

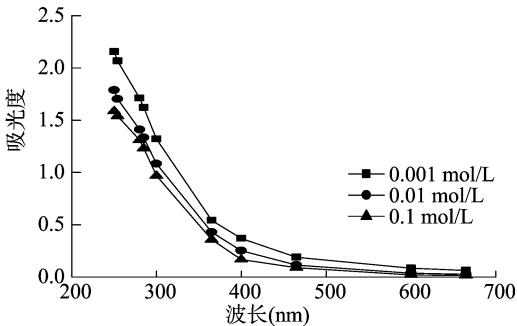


图5 不同离子强度下吸附平衡后 DOM 的紫外可见吸光度曲线

2.3.2 温度对 DOM 吸附热力学的影响 由温度对黑土吸附 DOM 热力学过程的影响及其 Langmuir 等温方程拟合曲线(图 6)可知,在同一温度下,土壤对 DOM 的吸附量都是随着 DOM 平衡浓度的增加而增加的。土壤对 DOM 的吸附量随着温度的升高而下降,这表明黑土对 DOM 的吸附是放热过程。不同温度下黑土对 DOM 吸附的 Langmuir 等温方程拟合参数结果见表 3。由表 3 可知,在不同温度下,黑土对 DOM 的饱和吸附量 (Q_{max}) 顺序为 15 ℃ > 25 ℃ > 35 ℃,25、35 ℃ 时饱和吸

附量分别比 15 ℃ 时下降 27.03% 和 31.02%。在不同温度下吸附亲和常数 b 的大小顺序为 15 ℃ > 25 ℃ > 35 ℃。由此可见,当环境温度为 15 ℃ 时,土壤对 DOM 的亲合力最大。

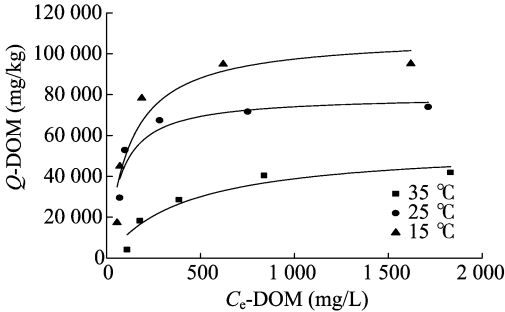


图6 不同温度下黑土吸附 DOM 的 Langmuir 等温拟合曲线

根据式(5)、式(6)和式(7)分别计算 ΔG 、 ΔS 和 ΔH ,结果见表 3。由表 3 可知, $\Delta G > 0$,这表明黑土对 DOM 的吸附反应不能自发进行。随着温度升高, ΔG 逐渐增大,这说明随着温度的升高,黑土对 DOM 的吸附速度逐渐降低。 ΔS 和 ΔH 都为负数,这表明吸附反应过程为放热熵减反应。 ΔH 是自由焓,在吸附过程中反映吸附质与吸附剂相互作用力的性质。根据吸附质-吸附剂的作用力不同,吸附过程可分为物理吸附和化学吸附,通常物理吸附的焓变较小($\Delta H < 4.184$ kJ/mol),而该反应的 ΔH 为 -62.97 kJ/mol,说明 DOM 在土壤上的吸附过程以化学吸附为主,此结果与吸附动力学得到的结果一致。同时根据 von Open 等的研究^[20](表 4)来推测,主要吸附作用力为化学键作用。 ΔS 是吸附前后体系有序度或混乱度的量度,熵减显示黑土对 DOM 吸附后能使 DOM 呈现较好的定向分布,有序性增强。由于不仅 ΔH 为负值, ΔS 也为负值,根据关系式 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 来看,则 ΔG 是否出现负值主要取决于 ΔH 的大小,故这种放热熵减反应应属焓减控制过程。由此可见,黑土对 DOM 产生强烈的化学吸附并呈现显著的放热反应时,DOM 的吸附才会自发进行。

表 3 DOM 在黑土上吸附的热力学参数

| 温度 (℃) | ΔG (kJ/mol) | ΔH (kJ/mol) | ΔS [J/(K·mol)] |
|-----------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 15 | 0.13 | | |
| 25 | 1.46 | -62.97 | -215.75 |
| 35 | 4.12 | | |

表 4 各种作用力引起的吸附热

| 作用力类型 | 范德华力 | 疏水键力 | H 键 | 离子 交换 | 偶极键力 | 化学键 |
|-------------|------|------|------|----------|------|-----|
| 吸附热(kJ/mol) | 4~10 | 5 | 2~40 | 40 | 2~29 | >60 |

3 结论

黑土对 DOM 的动力学过程包括快速吸附和慢速吸附 2 个阶段,而且在 24 h 内达到吸附平衡。准二级动力学方程能很好地拟合黑土对 DOM 吸附的动力学过程。随着 DOM 平衡浓度的增加,黑土对 DOM 的吸附量增加。黑土对 DOM 吸附的热力学过程可以很好地与 Langmuir 方程进行拟合。黑土对 DOM 吸附热力学与离子强度和温度有关,随着离子强度的增加,黑土对 DOM 的饱和吸附量增加,在离子强度为 0.01 mol/L 时,土壤对 DOM 的吸附亲和力达到最大值;随着

温度的增加,黑土对 DOM 的饱和吸附量降低。黑土对 DOM 吸附的动力学特征与土壤类型有关。在温度为 15 ℃ 时,土壤对 DOM 的亲和力最大。黑土对 DOM 的吸附反应是放热熵减反应,属焓减控制过程,而且吸附机制以化学吸附为主。

参考文献:

[1] Lægdsmand M, de Jonge L W, Møldrup P, et al. Pyrene sorption to water-dispersible colloids: effect of solution chemistry and organic matter[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(2): 451-461.

[2] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.

[3] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. 环境化学, 2003, 22(5): 427-433.

[4] 徐玉芬, 吴平霄, 党志. 水溶性有机质对土壤中污染物环境行为影响的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 307-312.

[5] 赵劲松, 张旭东, 袁星, 等. 土壤溶解性有机质的特性与环境意义[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 126-130.

[6] Ming L, Li L H, Zhang Y X, et al. Effects of dissolved organic matter on the desorption of Cd in freeze-thaw treated Cd-contaminated soils[J]. Chemistry and Ecology, 2014, 30(1): 76-86.

[7] 杨佳波, 曾希柏, 李莲芳, 等. 3 种土壤对水溶性有机物的吸附和解吸研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3656-3663.

[8] 康露, 吴景贵, 赵欣宇. 吉林省两种土壤对水溶性有机物吸附-解吸的影响因素(1)[J]. 东北林业大学学报, 2013(8): 130-135.

[9] Shen Y H. Sorption of natural dissolved organic matter on soil[J]. Chemosphere, 1999, 38(7): 1505-1515.

[10] Pengerud A, Johnsen L K, Mulder J, et al. Potential adsorption of dissolved organic matter in poorly podzolised, high-latitude soils[J]. Geoderma, 2014, 226/227: 39-46.

[11] 郭平, 明恋, 王观竹, 等. 黑土对冻融有机质的吸附作用[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2013, 51(4): 744-748.

[12] 杨佳波, 曾希柏. 水溶性有机物在土壤中的化学行为及其对环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 206-211.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.

[14] 张辉, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 高温高压间歇灭菌对中国典型土壤性质的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 540-548.

[15] 占新华, 周立祥, 卢燕宇. 农业常用有机物料中水溶性有机物的理化性质特征[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 619-624.

[16] Kostura B, Kulveitová H, Lesko J. Blast furnace slags as sorbents of phosphate from water solutions[J]. Water Research, 2005, 39(9): 1795-1802.

[17] Levy S B. Environmental dissemination of microbes and their plasmids[J]. Swiss Biotechnol, 1987, 5: 32-37.

[18] 吕俊佳, 许端平, 李发生. 不同环境因子对黑土胶体在饱和多孔介质中运移特性的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8): 875-881.

[19] 曲金潭, 庄杰. 黑土及棕壤 < 2 μm 胶体表面电化学特性的研究[J]. 土壤通报, 1997(2): 16-18.

[20] von Open B, Kordel W, Klein W. Sorption of nonpolar and polar compounds to soils: processes, measurement and experience with the applicability of the modified DECD-guideline[J]. Chemosphere, 1991, 22: 285-304.