

泰乐菌素对菲在蒙脱石上吸附作用的影响

胡秀敏, 杨琛*, 张倩, 党志

(华南理工大学环境科学与工程学院/工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要:在长期施用养殖粪肥的农田土壤中, 抗生素药物往往与其他有机污染物共存, 使各自在土壤中的迁移转化和生态效应变得更为复杂。采用批量振荡吸附平衡法, 研究了在泰乐菌素存在的条件下蒙脱石对菲的吸附特性。结果表明: 蒙脱石对泰乐菌素有较强的吸附能力, 吸附容量可以达到 $250 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 泰乐菌素能进入蒙脱石层间, 使蒙脱石的层间距由 1.17 nm 增大到 1.28 nm ; 泰乐菌素存在的条件下, 蒙脱石对菲的吸附能力显著增强, 当泰乐菌素的初始浓度从 0 增加到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菲在蒙脱石上的吸附容量系数 $\lg K_f$ 值从 -4.047 增加到 0.591 , $\lg K_f$ 值与矿物上有机碳含量呈正相关, 这可能是由于已吸附的泰乐菌素可发挥类似“土壤有机质”的作用, 促进蒙脱石对菲的吸附。菲在蒙脱石上的吸附容量和吸附的非线性程度随泰乐菌素初始浓度的增加而增加, 由此推测, 泰乐菌素与菲之间的疏水性作用是菲在矿物上吸附的主要作用方式。在评估抗生素药物和疏水性有机物复合污染的环境风险时, 需要考虑到共存污染物的协同吸附作用。

关键词: 泰乐菌素; 菲; 蒙脱石; 协同吸附; 土壤有机质

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)04-0729-06 doi:10.11654/jaes.2013.04.011

Influences of Tylosin on Adsorption of Phenanthrene on Montmorillonite

HU Xiu-min, YANG Chen*, ZHANG Qian, DANG Zhi

(The Ministry of Education Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Antibiotics usually coexisted with other organic pollutants in long-term manure irrigated farm soil, which lead to the complicated transportation and transformation behaviors and ecological effects of these chemicals in the environment. Batch shock adsorption equilibrium method was used to investigate the adsorption properties of phenanthrene on clay mineral accompanied with tylosin. The results showed that tylosin exhibited strong adsorption capacity on montmorillonite, and the adsorption capacity could reach $250 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Tylosin could enter the interlayer of montmorillonite and increase the interlayer space from 1.17 nm to 1.28 nm . The sorption of phenanthrene on the montmorillonite was enhanced by preadsorbed tylosin, when the initial concentration of tylosin increased from 0 to $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The adsorption capacity coefficient $\lg K_f$ ranging from -4.047 to 0.591 , $\lg K_f$ was positively correlated with the organic carbon content in mineral, which might be due to the preadsorbed tylosin that could act as “soil organic matters”. The adsorption capacity and nonlinearity of phenanthrene on montmorillonite increased with the initial concentration of tylosin, indicating that the hydrophobic interaction between tylosin and phenanthrene might play a major role in phenanthrene adsorption on organic minerals. It should be considered the synergic adsorption of co-contaminants to assess the risk of antibiotic drugs and hydrophobic organic compound pollution in the environment.

Keywords: tylosin; phenanthrene; montmorillonite; synergistic sorption; soil organic matters

收稿日期: 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(41072268, 41173104); 广东省普通高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室开放基金资助

作者简介: 胡秀敏(1985—), 女, 山东菏泽人, 在读硕士, 研究方向为环境污染控制化学。E-mail: huxiumin123@163.com

* 通信作者: 杨琛 E-mail: cyanggz@scut.edu.cn

泰乐菌素作为一种大环内酯类抗生素,抗菌谱广、性质稳定、吸收和排泄迅速,而且具有良好的促生长作用,被广泛用于畜禽养殖^[1]。进入动物体内的抗生素药物,只有少部分被动物体吸收或者转化,有 85% 上的抗生素以原形或代谢物的形式经由畜禽粪尿排出体外^[2],并在施用动物粪肥的过程中进入农田土壤环境。与此同时,实际土壤中往往还共存有其他有机污染物,如多环芳烃等,这些共存污染物使各自在环境中的地球化学过程和生态效应变得更为复杂^[3]。已有研究表明,泰乐菌素在土壤中的迁移转化与土壤中广泛存在的粘土矿物有关^[4]。粘土矿物含有大量可交换的亲水性无机阳离子,使其表面通常存在一层薄的水膜,对可离子化的泰乐菌素具有较强的吸附能力,而不能有效吸附疏水性有机污染物^[5]。然而,由于泰乐菌素自身含有疏水性基团,一旦吸附在粘土矿物上,将可能改变矿物的表面性质,进而改变矿物对疏水性有机物的吸附,对疏水性有机物的迁移造成影响。为此,本文选择土壤/沉积物中常见的粘土矿物蒙脱石为吸附剂,以多环芳烃-菲作为典型疏水性有机物的代表,考察泰乐菌素对菲在粘土矿物吸附作用的影响,为正确评估复合污染条件下抗生素药物和疏水性有机物的环境风险提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

菲(纯度>99%)和泰乐菌素(纯度>95%)购自美国 Sigma 公司,-20 ℃ 保存;甲醇为色谱纯,购自上海安谱科学仪器有限公司,其他试剂均为分析纯,购自天津市科密欧化学试剂有限公司;实验用水为超纯水,由 Milli-Q 超纯水仪制备(Merck Millipore Advantage A10)。泰乐菌素的分子结构见图 1,其理化性质见表 1。

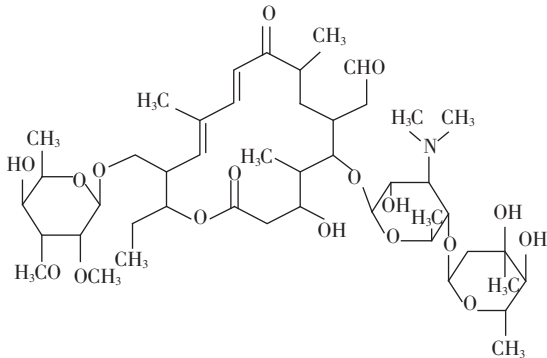


图 1 泰乐菌素的分子结构
Figure 1 Molecular structure of tylosin

表 1 泰乐菌素的理化性质^[6]

Table 1 Physical and chemical properties of tylosin^[6]

Compound	MW/g·mol ⁻¹	S _w /g·L ⁻¹	lgK _{ow}	pKa
Tylosin	917.14	5	3.5	7.1

蒙脱石购自美国矿物协会(Chantilly, VA),用乙二醇乙醚法(EGME)测试其比表面积为 617 m²·g⁻¹;用 Zeta 电位仪(Zetasizer Nano ZS 90, Malvern, UK)测试其零电荷点为 3.6;矿物的 pH 值测定采用固液比 1:1 (V:V),加入一定量的超纯水后振荡静置,用 pH 计(PHS-3C,雷磁,上海)测定为 5.5。

1.2 实验方法

分别用甲醇和超纯水配制 1 g·L⁻¹ 的菲和泰乐菌素储备液。背景溶液:0.01 mol·L⁻¹ 的 KNO₃ 保持溶液有一定的离子强度,100 mg·L⁻¹ 的 NaN₃ 以抑制微生物对有机物的降解。单吸附体系和双吸附体系的 pH 值分别用 Na₂HPO₄-NaH₂PO₄ 缓冲溶液和 5 mg·L⁻¹ 的 NaHCO₃ 调节至中性。

单吸附体系:称取一定量的蒙脱石于 30 mL 玻璃离心管中,同时加入一定浓度梯度(0.5~50 mg·L⁻¹)的泰乐菌素吸附液和 50~1000 μg·L⁻¹ 的菲吸附液,充分摇匀,在 150 r·min⁻¹, (25±2)℃ 条件下恒温振荡 24 h 后(预实验表明在此条件下已达到吸附平衡),离心,取一定量的上清液,用 HPLC 测上清液中相应吸附质的浓度。

双吸附体系:将特定浓度的泰乐菌素吸附液加入含有一定量蒙脱石的玻璃离心管中,于 150 r·min⁻¹, (25±2)℃ 的条件下恒温振荡 24 h 后,离心,除去上清液,再分别加入一定量 50~1000 μg·L⁻¹ 的菲吸附液,充分摇匀后,继续于 150 r·min⁻¹, (25±2)℃ 的条件下恒温振荡 24 h,离心,取上清液用 HPLC 测定其中菲的浓度。每个浓度均做 3 个平行。固相上吸附质的浓度通过质量守恒计算所得。

实验均在密封避光条件下进行,通过预实验表明实验过程中泰乐菌素及菲的挥发、微生物降解、光解和解吸均可忽略不计。

1.3 检测方法

上清液中吸附质的浓度用高效液相色谱(Agilent 1200 配二极管阵列紫外检测器)检测,配反相色谱分离柱 Luna(美国,Phenomenex 公司),C18(2)型色谱柱(250×4.6 mm, 5 μm),菲的流动相 V(乙腈):V(水)=90:10,检测波长 254 nm;泰乐菌素的流动相 V(KH₂PO₄):V(乙腈)=65:35,检测波长 290 nm。

矿物的层间距用 X 射线衍射仪(XRD,D/max-Ⅲ A 型,日本)检测:蒙脱石原始样品及吸附泰乐菌素达到吸附平衡后的样品离心后,除去上清液,冷冻干燥,在玛瑙研钵中磨匀,进行 X 射线衍射分析,同时设置空白对照样品。测试条件:Cu K_α 辐射波长为 0.154 06 nm,电压为 35 kV,电流为 25 mA,扫描速度为 10° (2θ)·min⁻¹,扫描范围为 3°~60°。矿物层间距是借助于 XRD 专用的分析软件 Jade5.0 得出的。

1.4 数据分析

吸附数据分别用 Linear、Freundlich 和 Langmuir 模型进行拟合,

$$\text{Linear 模型: } q_e = K_d C_e \quad (1)$$

$$\text{Langmuir 模型: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} b} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2)$$

$$\text{Freundlich 模型: } q_e = K_f C_e^n \quad (3)$$

式中: q_e 为达到吸附平衡时吸附质在固相上的吸附量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; C_e 为达到吸附平衡时吸附质在液相中的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; K_d 为吸附分配系数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; $q_{\max}$ 为单分子层饱和吸附量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; b 为 Langmuir 常数, $\text{L} \cdot \mu\text{g}^{-1}$; K_f 为吸附容量系数, $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})^n$; n 为吸附的非线性因子,无量纲。

2 结果与讨论

2.1 泰乐菌素在蒙脱石上的吸附等温线

泰乐菌素在蒙脱石上的吸附等温线见图 2, 吸附数据用上列公式进行拟合, 拟合参数见表 2。

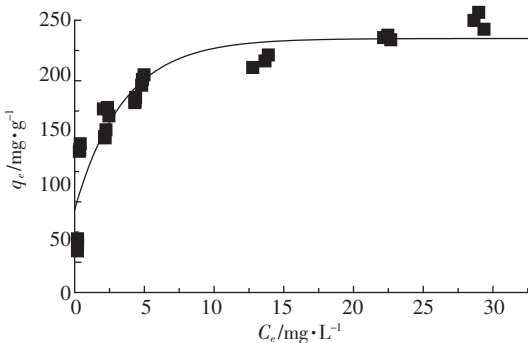


图 2 泰乐菌素在蒙脱石上的吸附等温线
Figure 2 Sorption isotherm of tylosin on montmorillonite

蒙脱石对泰乐菌素的吸附明显呈非线性, 用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程均能较好地拟合吸附数据, 计算出的最大饱和吸附容量可达 $250 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与文献报道一致。Essington 等^[7]曾报道, 泰乐菌素在蒙脱石上的吸附量约为 $260 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由表 1 可知, 泰乐菌素的 pK_a 为 7.1, 当泰乐菌素处于中性和酸性环境时, 主要以有机阳离子状态存在, 此时, 蒙脱石表面带负电荷, 带正电荷的泰乐菌素可通过静电作用吸附到矿物表面, 还可能通过离子交换作用, 与蒙脱石层间的阳离子发生交换, 进入蒙脱石的层间。

进一步的 XRD 分析显示了泰乐菌素进入蒙脱石层间的情况, 如图 3 所示。

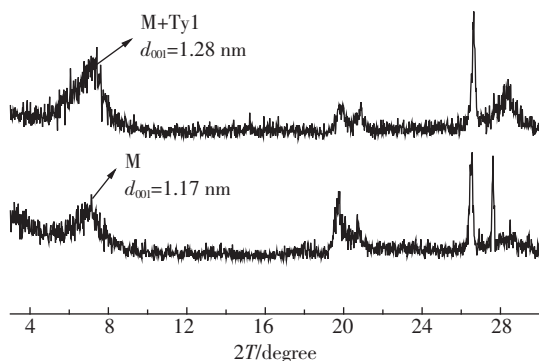


图 3 蒙脱石(原矿物和吸附泰乐菌素后)的 X 衍射谱图
Figure 3 XRD spectra of montmorillonite
(original mineral and adsorption sample)

从图 3 可以看出, 蒙脱石原始样品的 d_{001} 值为 1.17 nm, 是典型的钠-蒙脱石的层间距^[8], 吸附泰乐菌素后, d_{001} 值增大到 1.28 nm, 这意味着泰乐菌素进入了蒙脱石的层间。Aristilde 等^[9]也曾报道, 蒙脱石吸附氧四环素后, 其层间距可增加 0.1~0.6 nm。采用 HyperChem 软件(7.0 版)计算出泰乐菌素分子的最小和最大三维尺寸分别为 $2.5 \text{ nm} \times 0.9 \text{ nm} \times 0.9 \text{ nm}$ 和 $2.8 \text{ nm} \times 1.2 \text{ nm} \times 1.2 \text{ nm}$, 若矿物的层间距是 1.17 nm, 则进入蒙脱石层间的泰乐菌素分子, 其纵轴可能与矿物的内表面平行, 在内表面发生单层吸附。

由于吸附在蒙脱石上的泰乐菌素是含有疏水性基团的有机大分子, 吸附后将可能改变矿物的表面性

表 2 泰乐菌素在蒙脱石上吸附的等温线参数
Table 2 Sorption parameters of tylosin on montmorillonite

$q_{\max}/\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Langmuir 方程		Freundlich 方程			Linear 线性方程	
	$b/\text{L} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	R^2	$K_f/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})^n$	n	R^2	$K_d/\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$	R^2
2.50×10^5	4.28×10^{-3}	0.894	6.35×10^4	0.13	0.923	3.26	0.658

质,以矿物表面附着有机质的形式影响其他染物(如菲)在矿物上的吸附行为。

2.2 泰乐菌素存在下菲在矿物上的吸附

不同浓度泰乐菌素存在的条件下,菲在蒙脱石上的吸附等温线如图 4 所示。吸附数据用各方程式分别进行了拟合,拟合参数见表 3。

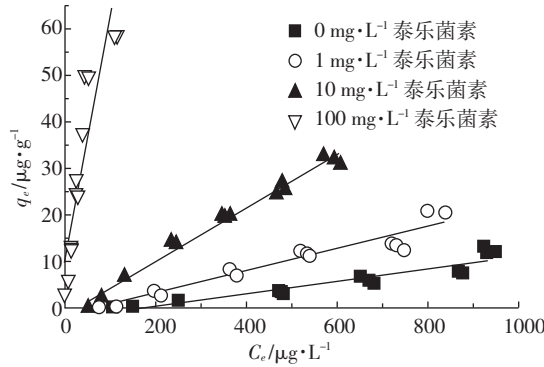


图 4 不同初始浓度泰乐菌素条件下菲在蒙脱石上的吸附等温线
Figure 4 Sorption isotherms of phenanthrene at the condition of different initial concentration of TYL

从图 4 可以看出,蒙脱石原始样品对非极性有机物菲有一定的吸附能力,分配系数 K_d 为 $0.012\text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$ 。李涛等^[10]报道了菲在蒙脱石原土上的吸附量为 $16.11\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,Huang 等^[11]报道菲在膨润土上的分配系数为 $0.07\text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$,本实验与文献报道的结果是一致的。同时可以看出泰乐菌素存在下能显著增加蒙脱石对菲的吸附。

通过 3 种吸附方程对吸附等温线的拟合结果发现,采用 Langmuir 方程拟合时, q_{max} 值为负值,这显然与 q_{max} 的物理意义不符,这种情况与陈华林等^[12]研究西湖底泥对菲的吸附有相似之处,因此 Langmuir 吸附等温方程不适合研究泰乐菌素存在下菲在蒙脱石上的吸附,而 Freundlich 方程和 Linear 线性方程均能较好地拟合菲在蒙脱石上的吸附行为。对疏水性有机

化合物在矿物表面的吸附机制,Su 等^[13]认为,矿物表面覆盖着一层水膜,非极性有机物在水膜中的分配作用导致此类有机物在矿物表面的吸附。由 Freundlich 模型拟合参数可以看出,菲在蒙脱石原始样品上吸附的 n 值大于 1,表明随着溶液中菲分子的增加,矿物对菲的吸附能力增强。这可能是因为吸附在粘土矿物上的菲进一步改善了粘土矿物表面的疏水性,或是通过 π - π 共轭等作用促进了溶液中菲分子的吸附。

菲在蒙脱石上的吸附容量随泰乐菌素初始浓度的增加不断增大,非线性因子 n 值随泰乐菌素初始浓度的增加而明显减少。当泰乐菌素的初始浓度从 0 增加到 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,菲在蒙脱石上的吸附容量系数 $\lg K_f$ 值从 -4.047 增加到 0.591 ,非线性因子 n 值则从 1.692 递减到 0.596 。当矿物上不存在泰乐菌素时, n 值大于 1,菲在矿物上的吸附容量随溶液中菲浓度的增加而增加;当矿物吸附初始浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的泰乐菌素后, n 值接近于 1,表明菲的吸附与溶液中菲的浓度无关^[14],是线性分配过程^[15],即对菲起吸附作用的主要是矿物上的有机质,此过程主要与有机质含量有关,而与矿物含量无关;当泰乐菌素的初始浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, n 值小于 1,菲在矿物上的吸附表现为非线性,低浓度下的菲分子首先占据高能吸附位点^[16],随着菲浓度的增大,高能吸附位点减少,矿物表面因吸附点位接近饱和而不能有效地吸附其他的菲分子^[17],从而导致菲在矿物上吸附增加的幅度降低。

吴宏海等^[18]认为,有机质对有机污染物在有机-无机矿物体系中的吸附分配起决定性作用,疏水性有机物的吸附主要取决于吸附剂中有机质的含量。在中性和酸性条件下,蒙脱石吸附泰乐菌素后,泰乐菌素通过静电吸引和离子交换作用,附着在矿物表面并进入层间,使泰乐菌素与蒙脱石之间形成一种类似于腐殖质-矿物的有机蒙脱石复合体。吸附的泰乐菌素可

表 3 不同浓度泰乐菌素条件下菲在蒙脱石上的吸附模型拟合参数

Table 3 Sorption parameters of phenanthrene on montmorillonite

$C_{\text{org}}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Langmuir 方程			Freundlich 方程			Linear 线性方程	
	$q_{\text{max}}/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$b/\text{L}\cdot\mu\text{g}^{-1}$	R^2	$\lg K_f$	n	R^2	$K_d/\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
0	-5.917	-0.000 7	0.989	-4.047	1.692	0.984	0.012	0.984
1	-40	-0.000 4	0.946	-3.491	1.290	0.948	0.024	0.978
10	-250	-0.000 2	0.992	-2.472	1.075	0.983	0.058	0.989
100	125	0.011 3	0.976	0.591	0.596	0.940	0.544	0.855

注: K_f 单位为 $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})^n$ 。

发挥类似于“土壤有机质”的作用。随着泰乐菌素初始浓度的增加,达到吸附平衡时,吸附的泰乐菌素也相应增加,这意味着矿物中“有机碳”含量增加。这里所指的有机碳含量,表现的是单位质量吸附剂吸附的泰乐菌素的质量(以有机碳计),计算公式如下:

$$f_{oc} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_1 为被吸附泰乐菌素中所含有机碳的含量,mg; m_2 为吸附剂的质量,mg。

吸附参数与计算所得有机碳含量之间的关系如图5所示,可以看出:菲在矿物上的吸附容量系数 $\lg K_f$ 与矿物中有机碳的含量呈正相关, n 值与有机碳含量呈负相关,且有机碳含量均大于1%。当土壤有机碳含量大于0.1%时,PAHs在土壤中的吸附主要为分配作用,与土壤有机碳含量呈正相关^[19],因此可以推断泰乐菌素与菲之间的疏水性分配作用可能是菲在蒙脱石上吸附的主要作用方式。这与菲在土壤/沉积物上的吸附行为相一致,随着有机质含量增加,菲的吸附能力逐渐增强^[20]。随着泰乐菌素浓度的增加,吸附的非线性逐渐增加,可能是由于随着泰乐菌素初始浓度增加,吸附在矿物上的泰乐菌素使矿物表面结构变得致密,疏水性增强,致使吸附的非线性增加。Murphy等^[21]曾观察到吸附在腐植酸-矿物复合体上的有机污染物发生非线性吸附,并指出有机质与矿物表面络合,致使有机质结构变得更加紧密,吸附的非线性程度增强。

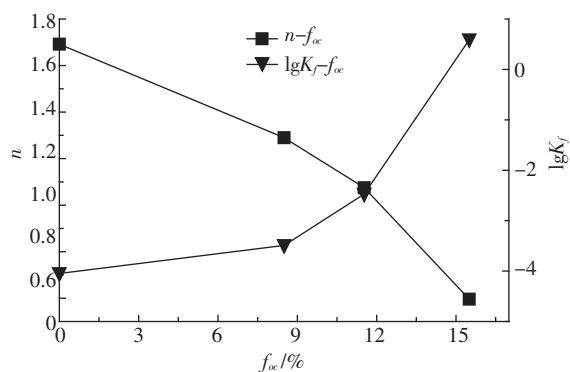


图5 吸附参数与矿物有机碳含量之间的关系

Figure 5 Relationships of sorption coefficients and organic carbon contents of minerals

3 结论

(1)蒙脱石对泰乐菌素有较强的吸附能力,泰乐菌素能进入到蒙脱石层间,使蒙脱石层间距增大。

(2)泰乐菌素能够显著提高蒙脱石对菲的吸附作用,泰乐菌素与菲之间的疏水性分配作用可能是菲在蒙脱石上吸附的主要作用方式,在评估抗生素药物和疏水性有机物复合污染的环境风险时,需要注意这一点。

参考文献:

- [1] 张倩,杨琛,党志,等.泰乐菌素在华南地区农业土壤上的吸附动力学和热力学特性[J].环境科学研究,2010,23(8):1019-1024. ZHANG Qian, YANG Chen, DANG Zhi, et al. Sorption kinetic and thermodynamic properties of tylosin on agriculture soils in South China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(8): 1019-1024.
- [2] 刘吉强,诸葛玉平,杨鹤,等.兽药抗生素的残留状况与环境行为[J].土壤通报,2008,39(5):1198-1203. LIU Ji-qiang, ZHUGE Yu-ping, YANG He, et al. Environmental fate and residue status of veterinary drugs, A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1198-1203.
- [3] Schwarzenbach R P, Escher B I, Fenner K, et al. The challenge of micro-pollutants in aquatic systems[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1072-1077.
- [4] 王丽平,章明奎.土壤性质对抗生素吸附的影响[J].土壤通报,2009,40(2):420-423. WANG Li-ping, ZHANG Ming-kui. Effects of soil properties of antibiotics[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2): 420-423.
- [5] 吴平霄,廖宗文.蒙脱石层间域的性质及其环境意义[J].地球科学进展,2000,15(2):184-189. WU Ping-xiao, LIAO Zong-wen. Character of montmorillonite interlayer and its environmental significance[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(2): 184-189.
- [6] Tolls J. Sorption of veterinary pharmaceuticals in soils: A review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(17): 3397-3406.
- [7] Essington M E, Lee J, Seo Y. Adsorption of antibiotics by montmorillonite and kaolinite[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 34(5): 1577-1588.
- [8] Ferrage E, Lanson B, Sakharov B A, et al. Investigation of smectite hydration properties by modeling experimental X-ray diffraction patterns: Part I. Montmorillonite hydration properties[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(8-9): 1358-1374.
- [9] Aristilde L, Marichal C, Miéhe-Brendlé J, et al. Interactions of oxytetracycline with a smectite clay: A spectroscopic study with molecular simulations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(20): 7839-7845.
- [10] 李涛,吴平霄,陈秋强.蒙脱石/DOM复合体对菲的吸附[J].环境科学学报,2010,30(2):383-389. LI Tao, WU Ping-xiao, CHEN Qiu-qiang. Sorption of phenanthrene on a montmorillonite /DOM (dissolved organic matter) complex[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 383-389.
- [11] Huang W L, Schlautman M A, Weber W J. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments; 5. The influence of near-surface characteristics in mineral momains[J]. *Environmental Science*

- & Technology, 1996, 30(10):2993-3000.
- [12] 陈华林, 陈英旭, 沈梦蔚. 西湖底泥对多环芳烃(菲)的吸附性能[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):585-589.
- CHEN Hua-lin, CHEN Ying-xu, SHEN Meng-wei. Sorption properties of PAHs(phenanthrene) on sediment in West Lake[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(5):585-589.
- [13] Su Y, Zhu Y, Sheng G, et al. Linear adsorption of nonionic organic compounds from water onto hydrophilic minerals: Silica and alumina[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(22):6949-6954.
- [14] Avisar D, Primor O, Gozlan I, et al. Sorption of sulfonamides and tetracyclines to montmorillonite clay[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2010, 209(1):439-450.
- [15] 朱利中, 李益民, 陈曙光. CTMAB-膨润土吸附水中有机物的性能及应用[J]. 环境化学, 1997, 16(3):233-237.
- ZHU Li-zhong, LI Yi-min, CHEN Shu-guang. The properties for CTMAB-bentonite to adsorb some organic compounds and application in wastewater treatment[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(3):233-237.
- [16] Xiao B H, Yu Z Q, Huang W L, et al. Black carbon and kerogen in soils and sediments: 2. Their roles in equilibrium sorption of less-polar organic pollutants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(22):5842-5852.
- [17] Kulshrestha P, Giese R F, Aga D S. Investigating the molecular interactions of oxytetracycline in clay and organic matter: Insights on factors affecting its mobility in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(15):4097-4105.
- [18] 吴宏海, 卢燕莉, 杜娟, 等. 红壤中矿物表面对腐殖质吸附萘的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6):539-543.
- WU Hong-hai, LU Yan-li, DU Juan, et al. The effects of mineral surfaces in red soils upon the sorption of naphthalene by humics[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26(6):539-543.
- [19] Ling W T, Gao Y Z. Promoted dissipation of phenanthrene and pyrene in soils by amaranth (*Amaranth tricolor* L.) [J]. *Environment International*, 2003, 29(5):613-618.
- [20] 许晓伟, 黄岁樑. 海河沉积物对菲的吸附解吸行为研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(1):114-122.
- XU Xiao-wei, HUANG Sui-liang. Adsorption-desorption behaviors of phenanthrene on sediments from the Haihe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(1):114-122.
- [21] Murphy E M, Zachara J M, Smith S C, et al. Interaction of hydrophobic organic compounds with mineral-bound humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(7):1291-1299.