

镉-铜-阿特拉津三元复合体系中 沉积物吸附阿特拉津过程的模型研究

高茜¹, 王倩¹, 王志增¹, 王岙^{2,3}, 李鱼¹

(1. 华北电力大学能源与环境研究院, 北京 102206; 2. 吉林省卫生监测检验中心, 吉林 长春 130062;
3. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130012)

摘要 建立了镉-铜-阿特拉津三元复合体系中沉积物吸附阿特拉津的BP神经网络模型,模型训练集、验证集、预测集的均方差分别为0.070、0.094和0.110,模型输入数据与其模拟值相关系数为0.974,验证实验表明该三元复合体系中阿特拉津吸附模型预测值与实验值的平均偏差为7.05% (7组数据)。所建模型的预测结果显示,镉-铜-阿特拉津三元复合体系中阿特拉津的主要吸附位是铁氧化物,其次是有机质,锰氧化物对阿特拉津的吸附具有抑制作用。与 Cu^{2+} 相比, Cd^{2+} 的添加对复合体系中阿特拉津的吸附作用影响更显著,且复合污染效应主要发生在锰氧化物和有机质上,并随锰氧化物和有机质含量的不同表现出抑制作用或促进作用。

关键词 阿特拉津;重金属;BP神经网络;沉积物;抑制作用;促进作用

中图分类号 X132;X592 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)01-0037-05

Modeling of atrazine adsorption on sediments in ternary system of cadmium-copper-atrazine//GAO Qian¹, WANG Qian¹, WANG Zhi-zeng¹, WANG Ao^{2,3}, LI Yu¹(1. Institute of Energy and Environmental Research, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Jilin Provincial Center for Sanitary Inspection and Test, Changchun 130062, China; 3. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A BP neural network model was established to simulate the adsorption process of atrazine in the ternary system of cadmium-copper-atrazine. The mean square deviations of the training set, validation set and prediction set of the model were 0.070, 0.094 and 0.110, respectively. The correlation coefficient between the input data and the simulated ones was 0.974. The mean deviation between the predicted values by the BP neural network model and the experimental ones was 7.05% ($n=7$) based on the validation experiments. The predicted results of the atrazine adsorption by the proposed BP model show that in the ternary system of cadmium-copper-atrazine, the main adsorption site of atrazine is the iron oxides, then the organic matters, and the manganese oxides restrain the atrazine adsorption. Compared with Cu^{2+} , Cd^{2+} influences the atrazine adsorption more significantly, and the combined effect occurs mainly on the manganese oxides and the organic matters and exhibits antagonistic or synergistic effect on the atrazine adsorption with different contents of manganese oxides and organic matters.

Key words: atrazine; heavy metal; BP neural network; sediment; antagonistic effect; synergistic effect

随着工农业的发展,越来越多的农药、化肥等农用化学品进入环境并共存,复合污染研究已逐渐成为环境科学发展的重要方向之一。自然环境中同时存在的金属离子是影响有机农药迁移转化的一个重要因素,金属离子可通过络合、竞争吸附以及影响农药分子的离子化等作用进而影响农药的环境行为^[1],不同的重金属种类与农药复合污染的形式有所不同^[2-3]。沉积物是众多污染物在环境中迁移转

化的载体、归宿和蓄积库^[4],其非残渣活性组分(铁氧化物、锰氧化物和有机质等)对重金属^[5-6]、有机农药^[7-8]等污染物在沉积物上的吸附起重要作用且吸附贡献也有所差异。李鱼等^[5,8]通过选择性萃取对沉积物样品中的活性组分进行分离,并分别考察了各组分对不同重金属^[5]及阿特拉津的吸附贡献。对于多种重金属与阿特拉津同时存在时各活性组分对阿特拉津的吸附规律还未见报道。

基金项目 国家自然科学基金(50879025)

作者简介 高茜(1983—),女,山东淄博人,博士研究生,从事环境污染与控制化学研究。E-mail: gq8778@hotmail.com

通讯作者 李鱼(1965—),男,吉林长春人,教授,博士,从事环境污染与控制化学、环境污染物形态、环境规划与评价研究。E-mail: liyuxx8@hotmail.com

BP 神经网络在处理没有先验函数结构且高度非线性的过程具有突出的能力^[9-10],许多学者将 BP 神经网络模型应用于环境学领域,包括对水溶液中 Pb^{2+} ^[11]、氯酚^[12]去除效果的预测,以及湖库中的藻类含量^[13]、地下水中氯离子迁移^[14]、杀虫剂浓度变化^[15]等参数的预测等,取得了很好的效果。三元复合污染体系中污染物较多,研究复合污染物在沉积物活性组分上的吸附规律需进行大量试验,且未知因素较多。笔者利用二元复合污染体系的数据建立了三元复合体系(镉-铜-阿特拉津)中沉积物组分吸附阿特拉津的 BP 神经网络模型,预测了沉积物吸附阿特拉津时受共存污染物种类、污染物质量浓度及沉积物组分质量分数的影响,初步揭示了复合污染条件下不同活性组分对阿特拉津的吸附机理。

1 研究方法

1.1 数据来源

沉积物样品采自松花江吉林市江段国防园广场(离江湾桥较近)处。采用选择性化学萃取技术对沉积物中非残渣组分(铁、锰氧化物及有机质)进行选择分离,用 0.1 mol/L $NH_2OH\cdot HCl$ + 0.1 mol/L HNO_3 振荡 30 min 萃取锰氧化物,用 0.2 mol/L $(NH_4)_2C_2O_4$ 并用草酸调节 pH = 3.0,避光振荡 4 h,同时萃取铁、锰氧化物;采用 H_2O_2 (质量分数 30%, 40℃水浴恒温 48 h)萃取有机质。用 WYX-9004 型原子吸收分光光度计测定选择性萃取前后沉积物中金属铁、锰的含量。利用岛津 TOC-5000 型总有机碳测定仪(配置 SSM-5000 型固体燃烧装置)测定各样品中 TOC 的含量。准确称取一系列 0.500 0 g 选择性萃取前后的沉积物样品,置于 100 mL 磨口三角瓶中,加入 20 mL 不同质量浓度的阿特拉津(AT 0.5 ~ 10 mg/L)或同时添加重金属铜(Cu^{2+} 0 ~ 75 mg/L)/镉(Cd^{2+} 0 ~ 4 mg/L),室温下振荡 48 h,取上清液过 0.22 μm 滤膜(各溶液中均含 100 mg/L 的 NaN_3),于高效液相色谱仪上测定,利用差减法计算被沉积物吸附的 AT 量,整理并选取选择性萃取前后沉积物单独吸附 AT、同时吸附 AT 和 Cu^{2+} (或 Cd^{2+})的数据共 300 组^[17]作为建模数据。

验证实验选用 0.500 0 g 沉积物样品,分别选择 7 个质量浓度的 AT (1 ~ 10 mg/L),同时加入一定质量浓度的 Cu^{2+} (45 mg/L)和 Cd^{2+} (2 mg/L),计算三元复合体系中沉积物吸附 AT 的量。

1.2 模型建立及参数选择

模型设置 7 个输入变量:沉积物中锰氧化物质量比(X_1 , mg/g)、铁氧化物质量比(X_2 , mg/g)、有机质质量比(X_3 , mg/g)、残渣质量比(X_4 , mg/g)、 Cu^{2+}

初始质量浓度(X_5 , mg/L)、 Cd^{2+} 初始质量浓度(X_6 , mg/L)和 AT 初始质量浓度(X_7 , mg/L),1 个输出值:AT 吸附量(质量比, Y , $\mu g/g$),进行归一化处理。为避免模型出现过拟合现象,将有效样本集分为训练集样本(t_1)、验证集样本(t_2)和预测集样本(t_3),其中 t_1 用于模型的训练, t_2 用于验证模型的泛化能力, t_3 用于检验模型的预测能力但不参与模型的建立^[16]。通过 MATLAB 软件建立沉积物吸附 AT 的 BP 神经网络模型,在模型训练过程中如果模型的泛化能力不再提高,模型将停止训练,分析训练模型输出的均方差(M)^[16]和偏差(R)^[16]来选择稳定、可靠的模型。

以所选择的 300 组数据^[17]作为建模的训练集样本、验证集样本和预测集样本,随机抽取数据分入训练集、验证集、预测集,数据比例为 2:1:1。

2 结果与讨论

2.1 一元和二元复合体系中沉积物吸附 AT 的 BP 神经网络模型训练与分析

采用能够以任意精度逼近任意连续函数的 3 层前后反馈 BP 神经网络对沉积物进行 AT 的非线性吸附过程建模。沉积物吸附 AT 的 BP 神经网络模型采用动态构造法^[18]确定隐含层节点数为 12,即本模型最终采用 $7 \times 12 \times 1$ 结构。经多次预试验,选取达到训练网络收敛目标误差 0.005 作为模型训练的目标误差。在对数据输入因素进行归一化处理后,模型各参数依次确定为:训练步数 $E = 500\,000$,训练目标误差 $G = 0.005$,学习效率 $L = 0.01$ 。贝叶斯算法(Levenberg-Marquardt 法)是梯度下降法和牛顿法的结合,当网络权值数目较少时其收敛速度非常迅速^[19],所以选择 trainlm 作为网络训练函数对模型反复训练,直到其逐渐收敛到设定的目标误差为止。经过 69 步训练,模型达到设定目标误差(图 1)。分别用 R_1 , R_2 , R_3 表示训练集、验证集、预测集的偏差, M_1 , M_2 , M_3 表示训练集、验证集、预测集的均方差, r 表示 300 组模型所得数据与实验数据的相关

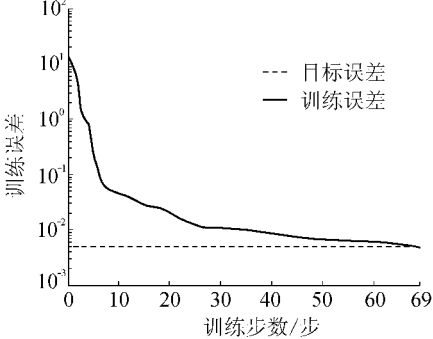


图 1 BP 模型训练迭代过程及误差

系数。经模型训练, $R_1 = 5.84 \times 10^{-5}$, $R_2 = 8.02 \times 10^{-5}$, $R_3 = 9.76 \times 10^{-5}$, $M_1 = 0.070$, $M_2 = 0.094$, $M_3 = 0.110$, 说明模型预测能力和泛化能力良好。 $r = 0.974$, 表明预测数据和实验数据显著相关。

2.2 BP神经网络模型的预测效果分析

因为所建模型的数据来源于一元体系(AT)及二元体系(AT和 Cu^{2+} 或 Cd^{2+})中沉积物吸附AT的热力学数据, 所以模型建成后为了检验其对三元体系(AT- Cd^{2+} - Cu^{2+})中AT吸附规律的预测准确性, 通过沉积物样品同时吸附3种污染物AT, Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的实验, 验证新建模型的预测能力。BP神经网络模型验证数据见表1。

将所建BP神经网络模型所预测三元复合体系中沉积物对AT的吸附量数据与实验数据进行对比, 7组数据预测值与实验值的偏差均小于15%, 平均偏差为7.05%, 预测结果可信。

表1 BP神经网络模型AT吸附量预测值与实验值对比

编号	$X_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$X_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$X_3/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$X_4/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$X_5/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$X_6/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$X_7/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Y		
								实验值 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	预测值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	偏差/ %
1	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	1.00	1.70	1.80	5.67
2	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	2.00	3.94	4.51	14.47
3	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	4.00	9.94	9.25	6.89
4	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	6.00	13.48	13.15	2.43
5	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	8.00	18.64	16.40	12.00
6	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	10.00	20.44	19.24	5.89
7	0.33	9.72	22.10	967.85	2.00	33.75	12.00	22.20	21.76	1.99

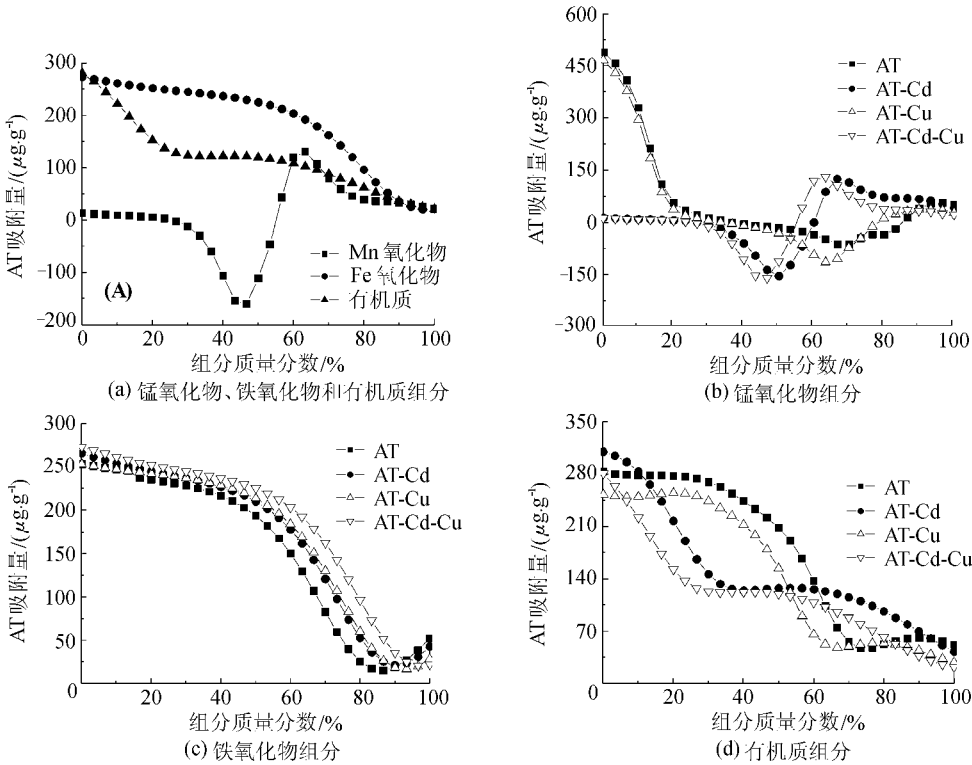


图2 不同污染物体系沉积物活性组分质量分数对AT吸附量的影响

2.3 基于BP神经网络模型的多元复合体系中沉积物吸附AT的规律

假设沉积物原样中各活性组分(铁、锰氧化物及有机质)的质量分数为100%, 以不同活性组分质量分数(0~100%)为自变量, 沉积物吸附AT的量(μg/g)为因变量, 利用所建BP神经网络模型预测三元复合体系(AT- Cd^{2+} - Cu^{2+})中沉积物3种活性组分吸附AT的规律(图2a)。另外, 为了进一步考察不同重金属与AT之间的复合污染效应对沉积物活性组分吸附AT的影响, 利用所建BP神经网络模型预测不同污染体系(AT, AT- Cd^{2+} , AT- Cu^{2+} , AT- Cd^{2+} - Cu^{2+})中活性组分(铁氧化物、锰氧化物和有机质)与AT吸附量之间的关系, 如图2b~2d所示。

由图2a可知, 三元复合体系中沉积物3种活性组分含量对AT吸附量的影响各不相同。随着锰氧化物质量分数的增加, AT吸附量先降低后升高, 最后趋于平衡。锰氧化物质量分数小于25%时AT

吸附量变化不大,随着锰氧化物质量分数的升高,AT 吸附量急剧下降,锰氧化物达到 47% 时 AT 吸附量最小,锰氧化物质量分数为 47% ~ 67% 时 AT 吸附量随锰氧化物质量分数升高而急剧上升,锰氧化物质量分数为 67% 时 AT 吸附量达到最高值,之后随着锰氧化物质量分数的增加,AT 吸附量缓慢降低,说明锰氧化物在质量分数为 0 ~ 47% 和 67% ~ 100% 这 2 个范围内对 AT 的吸附起抑制作用,而在 47% ~ 67% 范围内 AT 的吸附量与锰氧化物质量分数呈正相关。随着铁氧化物和有机质质量分数的增加,AT 的吸附量均随之降低,说明 AT 的吸附量与这 2 种活性组分的质量分数呈负相关,即铁氧化物和有机质抑制该三元复合体系中 AT 的吸附。AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 三元复合体系中,同等比例的活性组分,铁氧化物对应 AT 的吸附量最大,因此铁氧化物是 AT 在沉积物上的主要吸附位,其次是有机质,而锰氧化物在一定质量分数时会对 AT 的吸附产生抑制作用。Li 等^[8]通过选择性萃取方法确定沉积物吸附 AT 时,非残渣态组分中起主要作用的是铁氧化物,其次是有机质,锰氧化物对 AT 的吸附呈抑制作用,说明添加 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 以后,AT 在沉积物上的主要吸附位未发生变化。

由图 2(b) 可知,AT 单独存在体系和 AT-Cu²⁺ 共存体系中,锰氧化物对 AT 的吸附规律相近;AT-Cd²⁺ 共存体系和 AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 三元复合体系中,锰氧化物对 AT 的吸附规律相似,说明 Cu²⁺ 的加入对锰氧化物吸附 AT 的影响不大,尤其是锰氧化物质量分数小于 50% 时,二者的吸附曲线几乎重合。Cd²⁺ 的添加对锰氧化物吸附 AT 产生显著影响,同时加入 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 时,Cd²⁺ 对锰氧化物吸附 AT 的影响程度大于 Cu²⁺。不同体系中 AT 的吸附规律相似(图 2(c)),吸附量大小有一定变化。不同吸附体系中 AT 吸附量的大小顺序为:AT-Cd²⁺-Cu²⁺ > AT-Cu²⁺ ≈ AT-Cd²⁺ > AT,即 Cd²⁺ 及 Cu²⁺ 分别与 AT 共存时,均促进 AT 在铁氧化物上的吸附,而且促进作用相当;同时加入 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 时,AT 的吸附量最大,二者对 AT 在铁氧化物上的吸附呈现加和作用。AT 单独存在和 AT-Cu²⁺ 共存体系(图 2(d))中,AT 在有机质上的吸附规律相似,但 AT-Cu²⁺ 体系中有机质对 AT 的吸附量要小于 AT 体系,即共存的 Cu²⁺ 抑制了 AT 在有机质上的吸附,而 AT-Cd²⁺ 体系与 AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 体系中 AT 在有机质上的吸附规律相似,且 AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 体系中 AT 的吸附量小于 AT-Cd²⁺ 体系中 AT 的吸附量,说明 Cd²⁺ 对 AT 在有机质上的吸附起主要作用,且三组分复合体系中 Cu²⁺ 同样抑制 AT 的吸附。

综上所述,Cd²⁺、Cu²⁺ 与 AT 在沉积物上吸附的复合作用主要发生在锰氧化物和有机质上,且 Cd²⁺ 对 AT 的吸附影响更加显著。沉积物对有机化合物吸附主要有 2 种机理,即分配作用和表面吸附作用^[20]。AT 在铁氧化物上的吸附可能主要以表面吸附作用为主,加入 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 以后对吸附规律影响不大,而 AT 在锰氧化物和有机质上的吸附主要以分配作用为主。Cu²⁺ 的加入只影响 AT 在锰氧化物和有机质上的吸附程度,且对 AT 在锰氧化物上的吸附影响不显著,对 AT 在有机质上的吸附表现为抑制作用,主要是因为 Cu²⁺ 容易与有机质发生螯合作用而且只有 Cu²⁺ 可以在低 pH 值条件下与有机质发生晶体内螯合行为^[21-22],因而减少了 AT 的可吸附量。共存的 Cd²⁺ 影响 AT 在锰氧化物和有机质上的吸附规律,且组分含量不同时复合污染效应也不同,低组分含量时共存的 Cd²⁺ 对 AT 的吸附呈拮抗作用,而高组分含量时则呈现促进作用,该结果与 Li 等^[3]所研究在 Cd²⁺ 质量浓度较低时其对 AT 在沉积物上的吸附呈促进作用,而 Cd²⁺ 质量浓度较高时呈抑制作用的结果相一致。

3 结 语

a. 应用 BP 神经网络模型模拟 AT 分别与 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 共存时 AT 在沉积物上的吸附规律,所建模型 3 种集合的偏差分别为 5.84×10^{-5} 、 8.02×10^{-5} 、 9.76×10^{-5} ,均方差分别为 0.070、0.094、0.110,模型输入数据与其模拟值相关系数 $r = 0.974$ 。

b. 通过验证实验考察新建 BP 神经网络模型对三元复合体系 AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 中 AT 吸附规律的预测能力,7 组数据预测值与实验值的偏差均小于 15%,平均偏差为 7.05%。

c. 利用新建 BP 神经网络模型模拟并预测多元复合体系中 AT 在沉积物上的吸附规律,AT-Cd²⁺-Cu²⁺ 三元复合体系中 AT 在沉积物组分上的主要吸附位是铁氧化物,其次是有机质,一定组分含量的锰氧化物会对 AT 的吸附产生抑制作用。共存的 Cd²⁺ 对 AT 吸附的影响明显强于 Cu²⁺,Cd²⁺ 的复合污染效应主要发生在锰氧化物和有机质上,且组分含量较低时 Cd²⁺ 的添加对 AT 的吸附表现出抑制作用,组分含量高时则表现出促进作用。

综上所述,对多元复合体系中沉积物吸附 AT 的过程进行模型化研究,有利于进一步明确复合污染物之间的作用机理,为多组分体系的复合污染修复提供一定的理论支持。

参考文献:

[1] 陶庆会,汤鸿霄.共存污染物对阿特拉津在天然沉积物

上吸附的影响[J].环境科学学报 2004 24(4):696-701.

[2] LI Yu , WANG Ao , GAO Qian , et al. Competitive adsorption between atrazine and copper on the surficial sediments and natural surface coating samples[J]. Fresenius Environmental Bulletin 2009 ,18(12) 2373-2379.

[3] LI Yu , GAO Qian , WANG Xiao-li , et al. Synergetic and antagonistic effects of cadmium on adsorption of atrazine on surficial sediments [J]. Chemical Research in Chinese Universities 2009 25(2) :155-160.

[4] USERO J , GAMERO M , MORILLO J. Comparative study of three sequential extraction procedures for metals in marine sediments[J]. Environmental International ,1998 24(4) :487-496.

[5] 李鱼 ,王晓丽 张正 ,等.表层沉积物(生物膜)非残渣态组分的选择性萃取分离及其吸附铜/锌的特性[J].高等学校化学学报 2006 27(12) 2285-2290.

[6] 李鱼 ,王晓丽 陈昕 ,等.湿地水环境中表层沉积物吸附铅、镉能力的研究[J].吉林大学学报 :地球科学版 , 2005 35(2) 231-235.

[7] 李鱼 刘亮 董德明 ,等.有机氯类农药对自然水体生物膜吸附 Pb ,Cd 能力的影响[J].自然科学进展 2003 ,13(8) 866-869.

[8] LI Yu , WANG Ao , GAO Qian , et al. Measurement of atrazine adsorption onto surficial sediments (natural surface coatings) : new evidence for the importance of Fe oxides[J]. Chemical Research in Chinese Universities 2009 25(1) :31-36.

[9] HOLGER R M , NICOLAS M , CHRISTOPHER W K C. Use of artificial networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters[J]. Environmental Modeling and Sofeware 2004 ,19 :485-494.

[10] 屈思义 陈亚新 史海滨 ,等.地下水文预测中 BP 网络的模型结构及算法探讨[J].水利学报 2004(2) 88-93.

[11] KANAN Y , SEVGI D. Artificial neural network (ANN) approach for modeling of Pb(II) adsorption from aqueous solution by Antep pistachio (Pistacia Vera L.) shells[J]. Journal of Hazardous Materials 2008 ,153 :1288-1300.

[12] KUNWAR P S , PRIYANKA O , AMRITA M , et al. Partial least squares and artificial neural networks modeling for predicting chlorophenol removal from aqueous solution[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems ,2009 ,99 : 150-160.

[13] RECKNAGEL F , FRENCH M , HARKONEN P , et al. Artificial neural network approach for modeling and predication of algal blooms[J]. Ecological Modeling ,1997 , 96 :11-28.

[14] CÜMARAH F F , ÖZ B , GÜLER B , et al. The application of artificial neural networks for the prediction of water quality of polluted aquife[J]. Water Air and Soil Pollution 2000 ,119 : 275-293.

[15] SAHOO G B , RAY C , WADE H F. Pesticide prediction in ground water in North Carolina domestic wells using artificial neural networks[J]. Ecological Modeling 2005 ,183 :29-46.

[16] 孟凡欣 郭伟良 杜林娜.纤维堆囊菌发酵液中埃博霉素含量的 HPLC 法分析[J].高等学校化学学报 2009 ,30(10) :1960-1964.

[17] 王岙.共存污染物对沉积物及其主要组分吸附阿特拉津的影响研究[D].长春 :吉林大学 2009.

[18] 尚钢 吴代华.基于神经网络对扁壳结构载荷位置识别问题的研究[J].固体力学学报 2001 22(1) 63-65.

[19] 高雪鹏 丛爽.BP 网络改进算法的性能对比研究[J].控制与对策 2001 ,16(2) :167-171.

[20] 朱利中 徐霞 胡松 ,等.西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理[J].环境科学 2000 21(2) :28-31.

[21] DONG De-ming , LIU Liang , HUA Xiu-yi , et al. Comparison of lead , cadmium , copper and cobalt adsorption onto metal oxides and organic materials in natural surface coatings[J]. Microchemical Journal , 2007 , 85 : 270-275.

[22] GUO Shu-hai , WANG Xiao-li , LI Yu , et al. Investigation of Fe , Mn , Zn , Cu , Pb and Cd fractions in the natural surface coating samples and surficial sediments in the Songhua River , China[J]. Journal of Environmental Sciences ,2006 ,18(6) : 1193-1198.

(收稿日期 2010-05-14 编辑 高建群)

(上接第 32 页)

[5] BIRDIE T R , SURANA K S. The Use of interval analysis in hydrologic system[J]. Reliable Computing ,1998 4 :269-281.

[6] 邱艳霞.区间分析在水文预测不确定性研究中的应用[D].武汉 :武汉大学 2008.

[7] CHIEW F H S , PEEL M C , WESTERN A W. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD[C]// Mathematical Models of Watershed Hydrology. Littleton , Colorado :Water Resources Publication 2002.

[8] FRANCIS C , McMAHON T A. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 australian catchments [J]. Journal of Hydrology ,1994 ,153 :383-416.

[9] 夏仕锋.基于区间数学的结构不确定性区间分析方法的研究[D].南京 :河海大学 2000.

[10] MOORE R E , KEARFOTT R B , CLOUD M J. Introduction to interval analysis[M]. Philadelphia :Society for Industrial and Applied Mathematics PA 2009.

[11] 张扬.水文系统不确定性区间分析方法及其应用研究[D].武汉 :武汉大学 2009.

[12] ZHANG Xiang , CHEN Xiao-dan , FRANCIS C , et al. Application of the rainfall-runoff model SIMHYD to two catchments in China[C]//CHEN Xiao-hong. Hydrological Sciences for Managing Water Resources in the Asian Developing World. Guangzhou :IAHS 2008 :101-107.

(收稿日期 2010-04-02 编辑 骆超)