

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.020

NDA-66 树脂处理 DBP 生产废水及吸附行为

王惠英¹, 于鲁冀², 余 洋¹, 吴小宁², 柏义生¹, 梁亦欣¹

(1. 郑州大学环境技术咨询工程公司, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要:通过等温吸附试验,研究了超高交联树脂 NDA-66 对邻苯二甲酸(*o*-PA)的吸附性能及吸附行为,同时优化了 NDA-66 处理增塑剂 DBP 生产废水吸附-脱附工艺参数。经过初步筛选发现,NDA-66 树脂对 *o*-PA 具有良好的吸附性能,在温度为 15℃、30℃ 和 45℃ 条件下分别测定了吸附平衡数据,*o*-PA 在 NDA-66 树脂上的吸附平衡符合 Freundlich 等温吸附方程,温度对吸附的影响较大。参数优化试验结果表明:树脂吸附最佳工艺参数是:pH 2.0~2.4,温度 30℃,流速为 1.5 BV/h;树脂脱附最佳工艺参数,脱附剂用量及组成为 1 BV 8% NaOH+2 BV H₂O,脱附温度为 55℃,脱附流速为 1.5 BV/h。
关键词:邻苯二甲酸;超高交联树脂;等温吸附;吸附试验;DBP 生产废水
中图分类号:X783 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0103-05

Treatment of DBP production wastewater with NDA-66 resin and adsorption behavior

WANG Huiying¹, YU Luji², YU Yang¹, WU Xiaoning², BO Yisheng¹, LIANG Yixin¹

(1. Zhengzhou University Environmental Technology and Consulting Company, Zhengzhou 450002, China;
2. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The adsorption properties and behavior of hyper-crosslinked resin NDA-66 with regard to *o*-phthalic acid (*o*-PA) were studied through an isothermal adsorption experiment. Meanwhile, the adsorption-desorption processing parameters of the NDA-66 resin in treating DBP production wastewater were optimized. Through preliminary selection, the NDA-66 resin was found to perform strongly in adsorption of *o*-PA. The adsorption equilibrium data were detected at temperatures of 15℃, 30℃, and 45℃, respectively. The results show that the adsorption equilibrium data agreed with the Freundlich isotherm, and the temperature had a large influence on the adsorption process. The parameter optimization experiment shows that the optimal adsorption parameters of the NDA-66 resin are as follows: a pH value between 2.0 and 2.4, a temperature of 30℃, and a flow rate of 1.5 BV/h; and the optimal desorption parameters of the NDA-66 resin are as follows: a desorption agent amount and composition of 1 BV 8% NaOH and 2 BV H₂O, a temperature of 55℃, and a desorption rate of 1.5 BV/h.
Key words: *o*-phthalic acid; hyper-crosslinked resin; isothermal adsorption; adsorption experiment; DBP production wastewater

增塑剂通过改变聚合物分子结构可以增强产品的灵活性和韧性,进而在世界范围内被广泛使用^[1-2],以致在土壤、地表水、地下水和废水中均有增塑剂邻苯二甲酸酯类的存在^[3]。部分邻苯二甲酸酯类具有致突变性^[4]和致癌性^[5],是内分泌干扰物的一种^[6],引起了大家的特殊关注。邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate, DBP)是重要的邻苯二甲酸酯类化合物,可用于硝化纤维塑料、指甲油、爆炸材

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07210-005)
作者简介: 王惠英(1987—),女,硕士研究生,研究方向为水处理技术。E-mail: yingzi4001@163.com

料、漆制造等。DBP 是由邻苯二甲酸酐与正丁醇酯化生成,反应过程中以硫酸为催化剂,生产过程中会产生高浓度有机有毒废水,主要含邻苯二甲酸盐类、邻苯二甲酸、无机盐和醇类。由于邻苯二甲酸(*o*-phthalic acid,*o*-PA)及其盐类的存在对微生物会产生毒害作用,导致采用一般的生化处理难以将其从废水中彻底去除^[7-8]。对于氧化等破坏性方法,处理成本较高^[9-10],企业一般难以接受。目前此类废水治理的发展趋势是,采用对废水中的原料有机物进行回收利用与治理控制相结合的技术,其中采用树脂吸附法处理精细化工废水具有吸附效率高、脱附再生容易、可回收有用资源等优点^[11],在有机化工废水处理中得到了广泛应用。笔者采用新型超高交联树脂 NDA-66 处理 DBP 生产废水。该树脂是针对水溶性有机物而开发的新型超高交联树脂,是通过树脂骨架选择、孔结构调控,以及用氨基、磺酸基、羧基、苯甲酰基等能与废水中有毒有机污染物形成静电、络合、氢键作用的功能基,对树脂进行化学修饰,合成具有耐盐及吸附容量高等优点新型吸附树脂。笔者系统研究树脂对邻苯二甲酸的吸附行为,优化其处理邻苯二甲酸酯类生产废水的动态吸附脱附参数,旨在为该树脂的进一步工程应用提供实验依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验仪器及试剂

仪器:SHA-C 水浴恒温振荡器;HWY-10 型多功能恒温水箱;BS-30A 自动部分收集器;BT-100E 蠕动泵;752 型紫外分光光度计;玻璃吸附柱(Φ16 mm×320 mm,带保温夹套),自制;比表面积测定仪(Micromeritics ASAP 2000);傅里叶变换红外光谱仪(NEXUS 870);元素分析仪(Vario MICRO)。

吸附剂:超高交联树脂 NDA-66(由江苏南大环保科技有限公司提供),基本理化性质见表 1;XAD-4、煤质活性炭(Sigma-Aldrich 提供);D201、D301(郑州勤实科技有限公司提供)。

表 1 不同吸附剂的结构特征

吸附剂	极性	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	微孔面积/ (m ² ·g ⁻¹)	微孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均 孔径/ nm	C/H/N/O 元素分析
NDA-66	中等 极性	954.4	562.1	0.291 2	4.11	78.61/6.56/ 0/14.83
D201		8.4	3	0.001 5	62.73	53.82/8.23/ 4.67/33.28
D301		24.2	1.9	0.000 7	36.66	59.98/7.95/ 4.55/27.52
XAD-4	非 极性	780.7	0	0	5.64	81.89/7.2/ 0.06/10.85
活性炭		2065	0	0	5.23	79.79/3.08/ 0/17.13

试剂:邻苯二甲酸(Sigma-Aldrich)。
实际废水为河南新郑市某化工厂增塑剂 DBP 生产废水(*o*-PA 质量浓度在 8 789 ~ 11 547 mg/L 之间)。

1.2 实验方法

a. 吸附剂的选择。分别配制 5 个批次的 100 mL 浓度为 100、200、400、600、800、1 000 mg/L 的 *o*-PA 溶液,然后分别加入 0.2 g NDA-66、XAD-4、煤质活性炭、D201、D301,吸附 12 h 后达到平衡,分别取样测定 *o*-PA 质量浓度。

b. 吸附平衡试验。将经过预处理后的 0.2 g NDA-66 树脂置于 250 mL 锥形瓶中,然后加入 100 mL 质量浓度分别为 100、200、400、600、800、1 000 mg/L 的 *o*-PA 溶液,恒温振荡器转速为 120 r/min,分别测定温度为 15℃、30℃ 和 45℃ 时的吸附平衡曲线。

c. pH 对树脂吸附的影响。将未经预处理的废水水样取 100 mL 放入锥形瓶中,pH 分别调节至 0.4、0.8、1.2、1.5、2、2.4、3.4,将温度调至 30℃,恒温振荡器转速为 120 r/min,振荡时间为 24 h,测定废水吸附前后的 *o*-PA 质量浓度,考察 pH 对吸附的影响。

d. 固定床动态吸附脱附试验。将预处理后的废水分别以流速为 0.5、1、1.5、2、2.5 BV/h 通过装有 19 mL 树脂(湿体积,树脂粒径为 1.0 mm 左右)的玻璃吸附柱,测定吸附流出液各个级分的 *o*-PA 含量,作动态吸附曲线,考察流速对吸附的影响,确定最佳吸附流速;脱附时每次吸附水样为 8BV,以 NaOH 为脱附剂,在一定温度下以预定流速通过树脂床层,对达到吸附平衡的树脂进行脱附,考察脱附剂用量、脱附温度、脱附流速等因素对树脂脱附的影响,确定最佳脱附工艺条件。

e. 动态吸附-脱附稳定性试验:在最佳的吸附脱附工艺条件下,连续进行 10 次吸附-脱附试验,每次吸附水样体积为 8BV,测定吸附和脱附出水 *o*-PA 质量浓度,计算 *o*-PA 吸附量和脱附率,考察 NDA-66 树脂处理废水工艺的稳定性。

1.3 分析方法

o-PA,紫外分光光度法(λ = 波长 231 nm);pH 值,玻璃电极法。

吸附量的计算公式为

$$Q_e = V(\rho_0 - \rho_e) / M \tag{1}$$

式中: Q_e 为吸附量,mg/g; ρ_0 为溶液的初始质量浓度,mg/L; ρ_e 为吸附流出液中邻苯二甲酸的平均质量浓度,mg/L; V 为溶液的体积,L; M 为干树脂的质量,g。

脱附率 η 计算公式为

η = (ρ_{di} V_{di} / (ρ_i - ρ_e) V_a) × 100% (2)

式中:ρ_{di}为脱附液中邻苯二甲酸的质量浓度,mg/L; V_{di}为脱附液的总体积,mL;ρ_i为上柱液中邻苯二甲酸的质量浓度,mg/L; V_a为吸附废水的总体积,mL。

1.4 树脂性能分析

经预处理后的树脂进行红外分析测定树脂骨架结构,同时采用元素分析仪测定树脂中的 C、H 和 N 含量,O 含量通过质量差计算得到。

2 实验结果与讨论

2.1 吸附剂的性质及选择

通过吸附剂筛选试验方法对不同吸附剂分别进行吸附试验,结果见图 1。从图 1 可知:D-201、XAD-4、D-301 树脂吸附效果较差;NDA-66 和活性炭吸附效果较好,而 NDA-66 对高浓度的 o-PA 吸附效果优于活性炭(o-PA 质量浓度为 1 000 mg/L 时平衡吸附量分别为 NDA-66 215 mg/g、活性炭 196 mg/g),因为 NDA-66 不仅具有较大的比表面积,同时具有较高的微孔体积,且含氧功能基团较少,因此其疏水性更强(表 1),更有利于吸附^[12]。

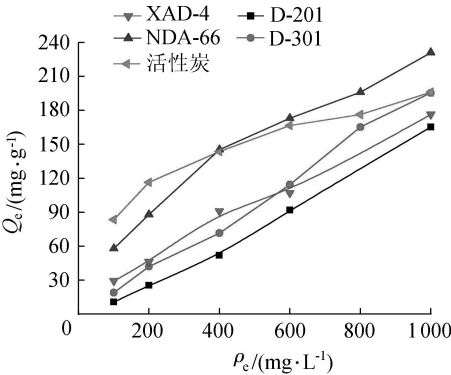


图 1 不同吸附剂对邻苯二甲酸的吸附效果

2.2 吸附平衡试验

Freundlich 和 Langmuir 方程式是目前应用最为广泛的等温吸附方程,计算过程见式(3)和式(4)。

lnQ_e = n⁻¹lnρ_e + lnK_f (3)

ρ_e/Q_e = q_m⁻¹ρ_e + K_L⁻¹q_m⁻¹ (4)

式中:K_f和 n 分别为 Freundlich 等温吸附方程常数; q_m为 Langmuir 等温吸附方程最大饱和吸附量,g/g; K_L为 Langmuir 等温吸附方程常数,L/g。

15℃、30℃和 45℃温度下的吸附平衡试验数据分别采用 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附方程进行拟合,结果见图 2~3。拟合得到的方程及参数见表 2~3。

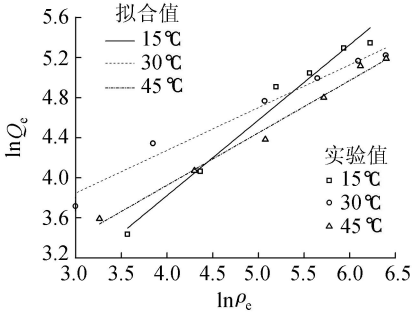


图 2 Freundlich 吸附等温线

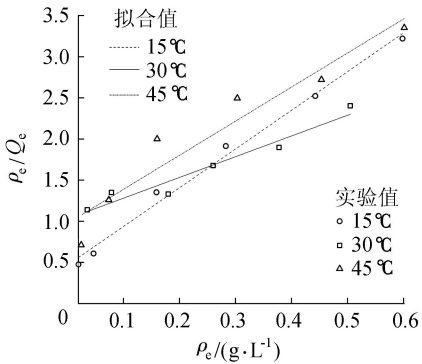


图 3 Langmuir 吸附等温线

表 2 Freundlich 吸附等温方程及参数

温度/℃	Freundlich 方程	K _f	n	R ²
15	lnQ _e =0.753lnρ _e +0.812	2.252	1.328	0.973
30	lnQ _e =0.427lnρ _e +2.567	13.027	2.342	0.971
45	lnQ _e =0.523lnρ _e +1.833	6.253	1.912	0.986

表 3 Langmuir 吸附等温方程及参数

温度/℃	Langmuir 方程	K _L /(L·g ⁻¹)	q _m /(g·g ⁻¹)	R ²
15	ρ _e /Q _e =2.520ρ _e +1.029	2.449	0.397	0.935
30	ρ _e /Q _e =4.705ρ _e +0.467	10.075	0.213	0.989
45	ρ _e /Q _e =4.142ρ _e +0.974	4.253	0.241	0.904

从表 2~3 可以看出,Freundlich 方程拟合的可决系数 R² 比 Langmuir 方程高且均大于 0.97,可见 NDA-66 超高交联树脂吸附 o-PA 的吸附平衡线更符合 Freundlich 吸附等温方程。Freundlich 理论指出 K_f 可作为评价吸附容量的依据,拟合结果表明不同温度下 K_f 变化较大,说明温度对 NDA-66 树脂吸附 o-PA 容量的影响很大,最佳温度为 30℃; n 均大于 1 表明吸附属于优惠吸附^[13]。

2.3 pH 对树脂吸附的影响

不同 pH 对 NDA-66 树脂处理 DBP 生产废水静态吸附平衡试验结果见图 4。废水 pH 在 0.4~3.5 之间,随着 pH 值的增加,NDA-66 树脂的平衡吸附量总体呈逐渐下降的趋势,从 203 mg/g 降至 72 mg/g,主要原因是:当 pH 大于 3.0 时,o-PA 表面呈负电,此时由于与树脂间的静电排斥作用增加以致吸附效果明显下降^[14],所以吸附量随着溶液 pH 的升高呈降低的趋势;其次,pH 越低,邻苯二甲酸在废水中呈分

子态比例越高,其溶解度越小,则疏水性增强,容易被吸附^[15-16]。

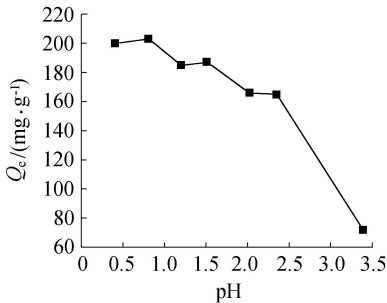


图4 pH 值对树脂静态吸附量的影响

pH 在 0.4 ~ 0.8 时,吸附量在 200 mg/g 左右,当 pH 由 2.4 升高至 3.4 时,吸附量从 165 mg/g 骤降至 72 mg/g,为保证树脂吸附效果并节约成本(减少 H₂SO₄ 投加量),选定 pH 最佳参数范围为 2.0 ~ 2.4。

2.4 固定床动态吸附-脱附实验

2.4.1 树脂吸附流速的影响因素

不同流速下树脂吸附穿透平衡体积见表 4。

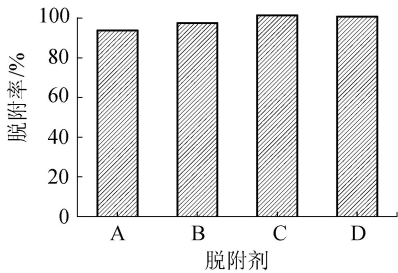
表 4 不同流速下开始穿透体积和吸附平衡体积		
流速/(BV · h ⁻¹)	开始穿透体积/BV	吸附平衡体积/BV
0.5	3	14
1.0	5	14
1.5	7	18
2.0	7	13
2.5	7	14

由表 4 可知,流速小于 1.5 BV 时,流速越大,树脂床开始穿透体积越大,但流速从 1.5 BV/h 升高至 2.5 BV/h 时,开始穿透体积没有变化,但是吸附平衡的体积变小。吸附流速较低有利于吸附质分子的粒扩散和膜扩散,吸附更为充分^[17],但总传质系数减少,生产效率降低;当流速过快时,总传质系数的增加不足以补偿流速的影响,使邻苯二甲酸不能被充分吸附,传质区长度增加,穿透时间缩短,动态吸附容量减少。综合考虑处理效果和处理成本,确定最佳流速为 1.5 BV/h。

2.4.2 树脂脱附的影响因素

a. 脱附剂用量对脱附的影响。树脂脱附时对酸性溶质一般选用稀碱作为脱附剂,对碱性溶质一般选用稀酸作脱附剂,而对于脂溶性溶质则选用有机溶剂作脱附剂^[11]。本试验吸附质为邻苯二甲酸,选用 NaOH 作为脱附剂,控制温度为 55℃,脱附流速为 1 BV/h,采用 4 种脱附剂用量对吸附饱和的树脂进行脱附,结果见图 5。

NaOH 的存在可使吸附质分子解离,使氢键作用、静电引力、氧官能团消失,进而使吸附质从树脂上洗脱下来^[18]。不同脱附剂用量对邻苯二甲酸的



注:图中 A:1 BV 4% NaOH+2 BV H₂O; B:1 BV 6% NaOH+2 BV H₂O; C:1 BV 8% NaOH+2 BV H₂O; D:1 BV 10% NaOH+2 BV H₂O, H₂O 为蒸馏水。

图5 脱附剂用量对邻苯二甲酸脱附的影响

脱附效果见图 5,脱附剂用量较低时即 1 BV 4% NaOH 脱附率为 93.67%,脱附剂用量增加,脱附率也呈升高趋势,1 BV 8% NaOH 和 1 BV 10% NaOH 对应的脱附率分别为 101.39% 和 100.46%。当 NaOH 的质量分数为 8% 时,脱附率已达到 100%,考虑到实际运行成本,试验最佳脱附量及组成为 1 BV 8% NaOH+2 BV H₂O。

b. 脱附温度对脱附的影响。本试验将脱附温度分别控制在 30℃、45℃、55℃ 和 65℃,对吸附饱和的树脂进行脱附,脱附剂用量及组成为 1 BV 8% NaOH 加 2 BV H₂O,脱附流速为 1 BV/h,结果见图 6。

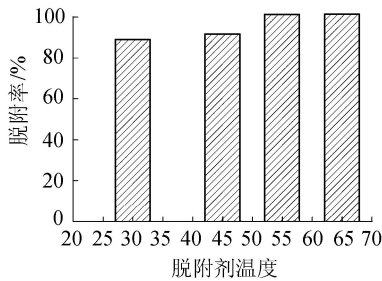


图6 温度对邻苯二甲酸脱附的影响

由图 6 所示,当脱附温度分别为 30℃、45℃、55℃ 和 65℃,脱附率分别为 89.17%、91.69%、101.39% 和 101.62%。温度越高脱附率越高,主要是因为脱附是吸附的逆过程,温度升高不利于吸附,但有利于吸附质分子从树脂表面扩散和溶解到脱附剂中^[17]。从图 6 可以看出,55℃ 和 65℃ 时脱附率相差不大,为了增加运行的可操作性,选择最佳脱附温度为 55℃。

c. 脱附流速对脱附的影响。在最佳的脱附剂用量及组成即 1 BV 8% NaOH 加 2 BV H₂O、最佳脱附温度为 55℃ 的条件下,脱附流速分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 BV/h 时,对邻苯二甲酸的脱附率分别为 102.29%、101.39%、101.78% 和 97.64%。流速越低脱附率越高,主要是因为流速低时邻苯二甲酸的扩散和溶解过程长,脱附更加充分。在流速小于

1.5 BV/h 时,脱附率都在 100% 以上,考虑到脱附效果和吸附-脱附时间的均衡,选择最佳脱附流速为 1.5 BV/h。

2.4.3 树脂吸附-脱附稳定性试验

在优化的工艺条件下连续进行 8 批次的吸附-脱附稳定性试验,结果见表 5。

表 5 吸附-脱附稳定性试验结果

试验批次	$\rho(o\text{-PA})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		去除率/%	脱附率/%
	进水	出水		
1	1 1547	330	97.14	95.87
2	9 041	175	98.06	93.40
3	8 789	193	97.80	95.46
4	9 604	221	97.70	96.63
5	9 544	516	94.60	99.19
6	9 916	227	97.71	93.97
7	9 484	222	97.66	91.02
8	9 149	219	97.60	96.52

由表 5 可知,在进水质量浓度在 8 789 ~ 1 1547 mg/L 之间,出水质量浓度在 175 ~ 516 mg/L,树脂吸附对邻苯二甲酸的去除率在 94.6% ~ 98.06%,脱附率在 91.02% ~ 99.19%,树脂吸附-脱附运行稳定可靠。

从图 7 可以看出,NDA-66 树脂重复使用 8 次后结构没有发生改变,说明该树脂性能较为稳定,重复使用效果好,适于工业化的应用。

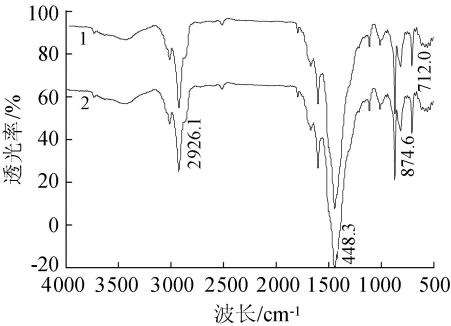


图 7 树脂重复使用后红外分析

3 结 论

- a. *o*-PA 在 NDA-66 树脂上的吸附符合 Freundlich 等温吸附方程,温度对吸附的影响较大,最佳温度为 30℃;
- b. 最佳的吸附工艺条件为:在进水浓度为原水条件下,最佳溶液 pH 为 2.0 ~ 2.4,最佳吸附温度为 15℃,固定床动态吸附最佳流速为 1.5 BV/h;
- c. 对吸附饱和的树脂进行脱附试验,得出最佳脱附条件为:脱附剂用量及组成为 1 BV 8% NaOH 加 2 BV H₂O,脱附率达到 101.39%,最佳脱附温度为 55℃,最佳脱附流速为 1.5 BV/h;
- d. NDA-66 树脂经多次吸附、脱附后树脂的吸

附性能及结构基本没有变化,说明该树脂对 *o*-PA 的吸附具有良好的再生吸附性能,可重复使用。

参考文献:

[1] NASCIMENTO F I D,VON M C,SCHOSSLER P,et al. Identification of some plasticizers compounds in landfill leachate[J]. Chemosphere,2003,50(5): 657-663.

[2] BAUER M J, HERRMANN R. Estimation of the environmental contamination by phthalic acid esters leaching from household wastes[J]. Science of the Total Environment,1997,208(1/2):49-57.

[3] WU Donglei, HU Baolan, ZHENG Ping, et al. Anoxic biodegradation of dimethyl phthalate (DMP) by activated sludge cultures under nitrate-reducing conditions [J]. Journal of Environmental Sciences,2007,19(10): 1252-1256.

[4] KOZUMBO W J,KROLL R,RUBIN R J. Assessment of the mutagenicity of phthalate esters [J]. Environment Health Perspect,1982,45: 103-109.

[5] HUFF J E,KLUWE W M. Phthalate esters carcinogenicity in F344/N rats and B6C3F1 mice[J]. Progress in Clinical and Biological Research,1984,141:137-154.

[6] ZHENG Z, ZHANG H, HE P J, et al. Co-removal of phthalic acid esters with dissolved organic matter from landfill leachate by coagulation and flocculation process [J]. Chemosphere,2009,75(2):180-186.

[7] ROY W R. The environmental fate of plasticizers [C]// Handbook of plasticizers. Ontario: Chem Tec Publishing, 2004.

[8] ZHANG Weiming, XU Zhengwen, PAN Bingcai, et al. Assessment on the removal of dimethyl phthalate from aqueous phase using a hydrophilic hyper-cross-linked polymer resin NDA-702 [J]. Journal of Colloid and Interface Science,2007,311(2): 382-390.

[9] XU Bin,GAO Naiyun,SUN Xiaofeng,et al. Photochemical degradation of diethyl phthalate with UV/H₂O₂ [J]. Journal of Hazardous Materials,2007,139(1): 132-139.

[10] CHEN Chihyu. The oxidation of di-(2-Ethylhexyl) phthalate (DEHP) in aqueous solution by UV/H₂O₂ photolysis[J]. Water Air Soil Pollution,2010,209(1/4): 411-417.

[11] 张全兴,陈金龙,许昭仪,等. 树脂吸附法处理有毒有机化工废水及其资源化研究[J]. 高分子通报,2005 (4): 116-121. (ZHANG Quanxing,CHEN Jinlong,XU Zhaoyi, et al. Application of polymeric resin adsorbent in organic chemical wastewater treatment and resources reuse [J]. Polymer Bulletin,2005 (4):116-121. (in Chinese))

[12] LONG Chao, LIU Peng, LI Ying, et al. Characterization of hydrophobic hypercrosslinked polymer as an adsorbent for removal of chlorinated volatile organic compounds [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45 (10): 4506-4512. (下转第 135 页)

Yongding River Basin [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2013,9(6):391-397. (in Chinese))

[14] 陈雨孙,马英林.论永定河水通过西山对北京市地下水的补给[J].水利学报,1981(3):10-18. (CHEN Yusun, MA Yinglin. On the recharge of ground-water in Beijing by the Yongding river through Western Hills[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1981(3):10-18. (in Chinese))

[15] 杨忠山,窦艳兵,王志强.北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J].中国水利,2010(19):52-54. (YANG Zhongshan, DOU Yanbing, WANG Zhiqiang. Analysis on the reasons of the decline of ground water level in the primary water supply source area of Beijing and the countermeasures [J]. China Water Resources, 2010(19):52-54. (in Chinese))

[16] [s. n.]北京水资源状况及用水结构分析[J]. 北京社会科学,2000(1):40-44. ([s. n.]. Analysis of water resources and water use structure in Beijing [J]. Social Science of Beijing,2000(1):40-44. (in Chinese))

[17] 侯景岩.北京地下水资源现状及对策[J].中国地质,1987(7):25-27. (HOU Jingyan. Present situation and Countermeasures of groundwater resources in Beijing[J]. Geology in China,1987(7):25-27. (in Chinese))

[18] 北京地方志编纂委员会.北京志·林业志[M].北京:北京出版社,2003.

(收稿日期:2015-09-13 编辑:王芳)

(上接第107页)

[13] 卢珂,曹炜,陈卫军,等.吸附树脂吸附蜂蜜中羟甲基糠醛的热力学研究[J].农业工程学报,2006,11(12):254-256. (LU Ke, CAO Wei, CHEN Weijun, et al. Thermodynamic properties of hydroxymethyl furfural in honey on the macroporous adsorption resin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2006,11(12):254-256. (in Chinese))

[14] JOSÉ D M D, MAHMOUD M A D, JOSÉ R U, et al. Adsorption/bioadsorption of phthalic acid, an organic micropollutant present in landfill leachates, on activated carbons [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012,369(1):358-365.

[15] 翟志才.超高交联吸附剂对苯基氨化合物的吸附行为及在废水处理中的应用研究[D].南京:南京大学,2003.

[16] 陆伟品,江淼,郑芳芳,等.多孔树脂及碳纳米管对环丙沙星的吸附行为与机理[J].化工学报,2012,63(11):3567-3573. (LU Yipin, JIANG Miao, ZHENG Fangfang, et al. Adsorption behavior and mechanism of ciprofloxacin onto porous resins and carbon nanotube [J]. CIESC Journal,2012,63(11):3567-3573. (in Chinese))

[17] BANSAL R C, GOYAL M. Activated carbon adsorption [M]. Boca Raton: Taylor & Francis,2005.

[18] YANG Weiben, LI Aimin, FU Chang'e, et al. Adsorption Mechanism of aromatic sulfonates onto resins with different matrices [J]. Ind. Eng. Chem. Res,2007,46(21):6971-6977.

(收稿日期:2015-09-30 编辑:彭桃英)

(上接第129页)

[7] HESTIR E L, KHANNA S, ANDREW M E, et al. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem [J]. Remote Sensing of Environment,2008,112(11):4034-4047.

[8] WANG C, MENENTI M, STOLL M P, et al. Mapping mixed vegetation communities in salt marshes using airborne spectral data [J]. Remote Sensing of Environment,2007,107(4):559-570.

[9] 刘伟龙,胡维平,陈永根,等.西太湖水生植物时空变化[J].生态学报,2007,27(1):1-12. (LIU Weilong, HU Weiping, CHEN Yonggen, et al. Temporal and spatial variation of aquatic macrophytes in west Taihu Lake [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(1):1-12. (in Chinese))

[10] 鲍建平,缪为民,李劫夫,等.太湖水生维管束植物及其合理开发利用的调查研究[J].大连水产学院学报,1991,6(1):13-20. (BAO Jianpin, MIAO weimin, LI Jiefu, et al. Preliminary study on the aquatic weeds of the Tai Lake and their rational development and utilization [J]. Journal of Dalian Fisheries College,1991,6(1):13-20. (in Chinese))

[11] 雷泽湘,徐德兰,黄沛生,等.太湖沉水和浮叶植被及其水环境效用研究[J].生态环境,2006,15(2):239-243. (LEI Zexiang, XU delan, HUANG Peisheng et al. Submersed and floating-leaved macrophytes in Taihu Lake and their water environmental effect [J]. Ecology and Environment,2006,15(2):239-243. (in Chinese))

[12] BREIMAN L, FRIEDMAN J H, OLSHEN R A, et al. Classification and regression tree [M]. Monterey: U. S. A. Wadsworth International Group,1984:1-358.

[13] 王琪,周兴东,罗菊花,等.考虑生活史的太湖沉水植物优势种遥感监测[J].湖泊科学,2015,27(5):953-961. (WANG Qi, ZHOU Xingdong, LUO Juhua, et al. The remote sensed monitoring of the dominant submerged vegetation in lake Taihu considering life history [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5):953-961. (in Chinese))

(收稿日期:2015-11-23 编辑:王芳)