

文章编号:0253-9950(2012)06-0331-06

等离子体诱导乙烯吡啶修饰多壁碳纳米管 富集放射性核素 $^{60}\text{Co}(\text{II})$

任雪梅, 杨鑫, 赵桂霞, 杨世通, 胡君, 邵大冬, 谭小丽*

中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031

摘要:采用等离子体诱导方法在多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs)上修饰上乙烯吡啶, 获得乙烯吡啶改性碳纳米管(碳纳米管-乙烯吡啶, MWCNTs-g-VP)。用静态批实验的方法研究了 pH 值、吸附剂浓度和离子强度等因素对碳纳米管-乙烯吡啶富集放射性核素 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 的影响。结果表明:引入乙烯吡啶不仅能改善碳纳米管在水溶液中的分散性, 同时还能提高碳纳米管表面官能团的含量, 进而提高碳纳米管对 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 的富集效果; pH 值与离子强度对碳纳米管-乙烯吡啶富集 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 有显著影响; 碳纳米管-乙烯吡啶富集 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 的作用方式包括内层络合和外层络合。Langmuir 模型拟合结果显示:在 pH=7.5 时, 碳纳米管-乙烯吡啶对 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 的最大富集量是 13.9 mg/g, 相对较高的富集量说明碳纳米管-乙烯吡啶可以用于水溶液中放射性核素的富集。

关键词:等离子体诱导修饰; $^{60}\text{Co}(\text{II})$; 乙烯吡啶; 富集

中图分类号: TL942.1 **文献标志码:** A

Plasma Induced Multi-Walled Carbon Nanotube Grafted With 2-Vinylpyridine for Preconcentration of $^{60}\text{Co}(\text{II})$ From Aqueous Solutions

REN Xue-mei, YANG Xin, ZHAO Gui-xia, YANG Shi-tong, HU Jun,
SHAO Da-dong, TAN Xiao-li*

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract: Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were modified with 2-vinylpyridine (VP) by using N_2 plasma technique. The application of MWCNTs-g-VP in the preconcentration of $^{60}\text{Co}(\text{II})$ from large volumes of wastewater was investigated under ambient conditions. The results indicate that the VP molecules grafted on the surfaces of MWCNTs-g-VP can prevent the entanglement of MWCNTs and provide more functional groups, promoting the sorption of $^{60}\text{Co}(\text{II})$ on MWCNTs-g-VP. The preconcentration of $^{60}\text{Co}(\text{II})$ on MWCNTs-g-VP is strongly dependent on pH values and ionic strength, suggesting that inner-sphere complexation and outer-sphere complexation are the preconcentration mechanisms. According to the results simulated by Langmuir model, the maximum sorption capacity

收稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 20907055; 21107115; 21007074)

作者简介: 任雪梅 (1985—), 女, 四川凉山人, 博士研究生, 核能科学与工程专业

* 通信联系人: 谭小丽, E-mail: tanxl@ipp.ac.cn

ities ($C_{\max}$) of $^{60}\text{Co}(\text{II})$ are 13.9 mg/g on MWCNTs-g-VP at pH=7.5. The relatively high sorption capacity shows that MWCNTs-g-VP is a suitable material for the preconcentration and immobilization of radionuclides from large volumes of aqueous solutions in environmental pollution treatment.

Key words: plasma induced modification; $^{60}\text{Co}(\text{II})$; vinylpyridine; preconcentration

随着核能的发展和放射性同位素的利用,产生了大量放射性废水,严重威胁生态环境的安全,因此放射性废水的处理日益受到人们的重视。吸附法因其工艺简单、成本低廉、可净化高含盐量(大于 10 g/L)的放射性废水等特点受到研究者的青睐^[1]。目前,高富集量的复合吸附剂的研发是吸附法运用中的热点。在 1991 年日本教授 Iijima 发现了碳纳米管(MWCNTs)之后^[2],碳纳米管由于其优越的物理化学性质在多个学科领域受到广泛关注。高的比表面($150\sim 3\,000\text{ m}^2/\text{g}$)^[3]决定了碳纳米管可以作为多种有机和无机污染物的吸附剂。例如 Rao 等^[4]对碳纳米管和氧化碳纳米管吸附二价重金属离子(Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+})的技术可行性进行了综述;Yang 和 Xing^[5]对碳纳米管吸附有机物进行了综述。然而因为疏水性和惰性,碳纳米管在水溶液中容易团聚限制了它的实际应用。碳纳米管的表面改性不仅能改善其分散性,同时能引入不同种类的官能团,提高吸附性能。

一般来说,碳纳米管功能化的方法有以下几种:通过各种化学试剂进行化学修饰^[6-7];用聚合物包裹碳纳米管^[8];通过等离子体在碳纳米管上接枝上聚合物链^[9]。传统的化学修饰方法使用大量的化学试剂,在修饰过程中产生大量的化学试剂污染物,容易造成二次污染。而等离子体修饰方法可以在不破坏碳纳米管整体性质的情况下,将目标官能团直接修饰在碳纳米管表面,并且待修饰目标官能团不需要通常化学方法所需的保护措施,因此在修饰过程中可以避免大量化学溶剂的使用^[10]。等离子体表面修饰方法作为一种新型、高效、环保的手段受到重视。

乙烯吡啶(VP)是一种功能化的单体,因为吡啶环中的氮原子是强的电子给予者,同时吡啶环还能与含氨基、羧基、羟基等官能团的非金属表面作用^[11],所以被视为一种单官能团表面改性剂,用于在非金属表面固定和富集各种金属离子。本工作拟利用等离子体诱导技术在碳纳米管上修饰乙烯吡啶(表示为碳纳米管-乙烯吡啶,MWCNTs-g-VP),并

将制备得到的碳纳米管-乙烯吡啶用于放射性核素 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 的富集,目的是评估该新型复合材料用于废水中放射性核素富集的可行性。

1 实验部分

1.1 试剂及碳纳米管-乙烯吡啶的制备

$^{60}\text{Co}(\text{II})$,中国原子能科学研究院;MWCNTs,自制;NaCl、HCl、NaOH 和 VP 均为市售分析纯,并且使用前未做任何纯化处理。

等离子体反应装置见文献[10]。将 3.0 g MWCNTs 放入 250 mL 三口反应烧瓶中,密封,开机械泵抽真空(约 6.0 Pa),然后通氮气至反应器压强达 10 Pa,如此反复 3 次,最后将反应瓶中的气压维持在 10 Pa。然后打开电感耦合等离子体(ICP)电源进行等离子体放电,对 MWCNTs 表面进行等离子体处理 40 min(制得等离子体处理 MWCNTs 材料)。放电完毕后将待接枝单体乙烯吡啶迅速放入反应烧瓶中,在 80 °C 的恒温水浴振荡器中反应 24 h。反应结束后,将反应产物用适当有机溶剂(如乙醇)充分洗涤、过滤,以除去未反应的单体和生成的均聚物。最后将产物在 80 °C 干燥,制得等离子体诱导修饰 MWCNTs 复合材料(碳纳米管-乙烯吡啶,MWCNTs-g-VP)。碳纳米管-乙烯吡啶合成原理及性能表征见 Ren 等^[12]的报道。

1.2 主要仪器

AL204 型电光分析天平,感量 0.000 1 g,上海梅特勒-托利多仪器有限公司;pH-3B 型精密 pH 计,上海精密科学仪器有限公司;HY-4 调速多用振荡器,江苏金坛市荣华仪器制造有限公司;LG10-2.4A 型高速离心机,北京雷勒尔离心机有限公司;3100TR/AB 液体闪烁计数器,美国 Packard 公司。

1.3 实验方法

碳纳米管-乙烯吡啶对 $\text{Co}(\text{II})$ 吸附实验步骤如下:向聚乙烯离心管中加入一定量的碳纳米管-乙烯吡啶复合材料的悬浮液与设定离子强度的电解质溶液预平衡 24 h,然后加入设定浓度的 $\text{Co}(\text{II})$ 和放射性示踪剂 $^{60}\text{Co}(\text{II})$ 溶液,用极少量

的 HCl 或 NaOH 调节体系的 pH 至所需值。然后将混合均匀的悬浮液于 $T=283\text{ K}$ 下在振荡器上振荡 24 h 达到平衡后,以 $9\,000\text{ r/min}$ 离心分离固液相。

离子强度对碳纳米管-乙烯吡啶吸附 Co(Ⅱ) 的影响的吸附实验步骤如下:向聚乙烯离心管中加入一定量的碳纳米管-乙烯吡啶复合材料的悬浮液与不同离子强度的 NaCl 溶液($0\sim0.15\text{ mol/L}$)预平衡 24 h,然后加入设定浓度的 Co(Ⅱ) 和放射性示踪剂⁶⁰Co(Ⅱ)溶液,用极少量的 HCl 或 NaOH 调节体系的 pH 至固定值。然后将混合均匀的悬浮液于 $T=283\text{ K}$ 下在振荡器上振荡 24 h 达到平衡后,以 $9\,000\text{ r/min}$ 离心分离固液相。

实验中使用的⁶⁰Co(Ⅱ)为放射性示踪剂,用液体闪烁计数器测其计数。碳纳米管-乙烯吡啶吸附 Co(Ⅱ) 的量从吸附初始和平衡后两者的差值计算得到。所有实验数据均为 3 次实验的平均值,数据相对误差约为 5%。

用吸附率(Y)和分配系数(K_d)来表示 Co(Ⅱ) 的富集,计算公式分别为:

$$Y = \frac{\rho_0 - \rho_e}{\rho_0} \times 100\%$$

(1)

$$K_d = \frac{\rho_0 - \rho_e}{\rho_e} \cdot \frac{V}{m}$$

(2)

式中: ρ_0 , Co(Ⅱ) 在溶液中的初始质量浓度, mg/L ;
 ρ_e , Co(Ⅱ) 在溶液中平衡后的质量浓度, mg/L ;
 V ,悬浮液的体积, L ; m ,MWCNTs 的质量, g 。

2 结果和讨论

2.1 pH 值对吸附的影响

为了评估修饰上的乙烯吡啶对碳纳米管吸附量的影响,对比了碳纳米管改性前后对 Co(Ⅱ) 的富集率。pH 是控制富集过程的一个重要因素,因为改变溶液的 pH 值会影响吸附剂的表面性质同时会影响放射性核素的水解、络合和沉淀。pH 值对碳纳米管-乙烯吡啶和碳纳米管富集 Co(Ⅱ) 的影响示于图 1。由图 1 可知,pH 对 Co(Ⅱ) 的富集有重要影响, Co(Ⅱ) 在两种材料上的富集率均随 pH 升高而增加。碳纳米管的零电荷点约为 $5^{[13]}$,在 $\text{pH}<5$ 时,碳纳米管的表面带正电荷,由于静电斥力的作用,带正电的钴离子不易被吸附,同时溶液中的 H^+ 与钴离子竞争吸附位,故在低 pH 值下碳纳米管对 Co(Ⅱ) 的富集率较低。而碳纳米管-乙烯吡啶由于乙烯吡啶的引入不仅改善

了碳纳米管的分散性,同时还提高了官能团的含量,修饰在碳纳米管表面上的乙烯吡啶中含有的官能团,能通过式(3)和(4)与 Co(Ⅱ) 形成络合物^[14]。因此在低 pH 值下,碳纳米管-乙烯吡啶对 Co(Ⅱ) 的富集率远远高于碳纳米管。随着 pH 值的增加,表面位去质子化伴随着钴离子的水解,碳纳米管和碳纳米管-乙烯吡啶对 Co(Ⅱ) 的富集率均增加。从钴的形态分布图^[15]可以看出,在 $\text{pH}=8.5\sim11$,钴的主要形态是 Co(OH)^+ 和 Co(OH)_2 ,它们均易吸附在带负电荷的材料表面,故钴的富集率达到最大。因此在高 pH 值下,2 种材料对钴的富集率区别不大。

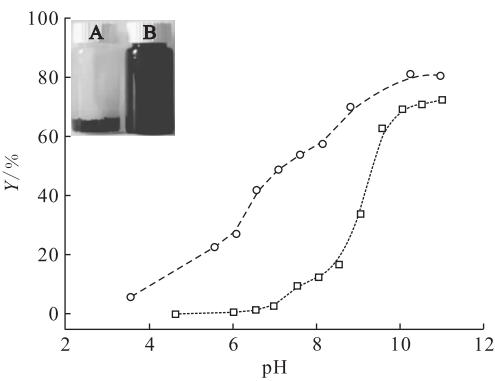
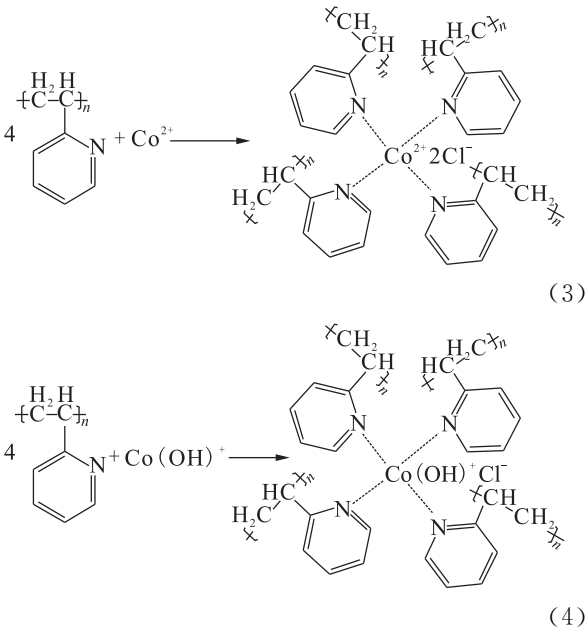


图 1 pH 值对碳纳米管-乙烯吡啶和碳纳米管富集 Co(Ⅱ) 的影响

Fig. 1 Effect of pH on the preconcentration of Co(Ⅱ) by MWCNTs-g-VP and MWCNTs
 $\rho_0(\text{Co(Ⅱ)})=6\text{ mg/L}$, $\rho_{\text{solid}}=0.6\text{ g/L}$,
 $c(\text{NaCl})=0.01\text{ mol/L}$, $T=283\text{ K}$
□——MWCNTs(A), ○——MWCNTs-g-VP(B)



2.2 吸附等温线

常温下 Co(Ⅱ)在碳纳米管上的吸附等温线示于图 2。分别采用 Langmuir^[16] 和 Freundlich^[17] 模型对实验数据进行拟合。2 种模型表达式如下：

$$C_s = C_{\max} \frac{K_L \rho_e}{1 + K_L \rho_e} \tag{5}$$

$$C_s = K_F \rho_e^{\frac{1}{n}} \tag{6}$$

式中： C_s ，富集到碳纳米管-乙炔吡啶上的 Co(Ⅱ)量，mg/g； $C_{\max}$ ，平衡时的最大吸附量，mg/g； K_L ，Langmuir 模型常数； K_F 和 n ，Freundlich 模型常数。

由 2 个模型计算得到的各参数值列入表 1。以拟合的相关系数 r 作为评价标准可以看出，Langmuir 模型最适合用来拟合 Co(Ⅱ)在碳纳米管-乙炔吡啶上的富集。通过 Langmuir 模型拟合得出碳纳米管-乙炔吡啶对 Co(Ⅱ)单层最大吸附容量为 13.9 mg/g。

吸附容量决定了从给定的溶液中定量富集吸附质时吸附剂的用量^[18]。表 2 列出了通过 Langmuir 模型计算得到的不同材料对 Co(Ⅱ)的最大

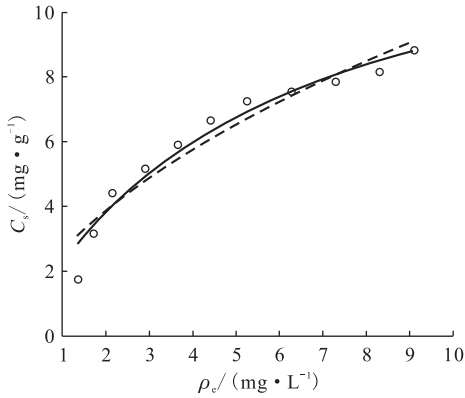


图 2 MWCNTs-g-VP 富集 Co(Ⅱ)的吸附等温线
Fig. 2 Sorption isotherm of Co(Ⅱ) by MWCNTs-g-VP
pH=7.50±0.02, ρ_{solid}=0.6 g/L,
c(NaCl)=0.01 mol/L, T=283 K
—— Langmuir 模型(Langmuir equation),
---- Freundlich 模型(Freundlich equation)

吸附容量。由表 2 可知，碳纳米管-乙炔吡啶对 Co(Ⅱ)的单层吸附容量高于大多数吸附剂，说明碳纳米管-乙炔吡啶可以用于溶液中放射性核素 ⁶⁰Co(Ⅱ)的富集。

表 1 Langmuir 和 Freundlich 模型参数

Langmuir			Freundlich		
$C_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	r^2	n	$K_F/(\text{mg}^{1-n} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1})$	r^2
13.9	0.189	0.958	0.562	2.633	0.920

表 2 不同材料对 Co(Ⅱ)吸附量的比较
Table 2 Comparison of Co(Ⅱ) sorption capacity by various sorbents

材料(Sorbents)	$C_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	条件(Conditions)	文献(References)
颗粒活性炭(Granular activated carbon)	4.993	pH=5.0, T=298 K	[19]
臭氧氧化的颗粒活性炭 (Granular activated carbon oxide by O ₃)	16.124	pH=5.0, T=298 K	[19]
天然约旦吸附剂(Natural Jordanian sorbent)	4.479	pH=7.0, T=298 K	[20]
钠基凹凸棒石(Na-attapulgit)	7.602	pH=6.0, T=293 K	[21]
壳聚糖(Chitosan)	0.477	pH=6.0, 室温(Room temperature)	[22]
磁性氧化石墨烯复合物 (Magnetite/graphene oxide composite)	12.98	pH=6.8, T=303 K	[23]
MWCNTs-g-VP	13.9	pH=7.5, T=283 K	本工作(This work)

2.3 吸附剂浓度对吸附的影响

吸附剂浓度对碳纳米管-乙炔吡啶富集 Co(Ⅱ)和 K_d 值的影响示于图 3。由图 3 可知：Co(Ⅱ)的富

集率随吸附剂浓度的增加而增加；随着吸附剂浓度的增加，可用的吸附位增加，因此在高吸附剂浓度下，Co(Ⅱ)的富集率更高； K_d 值在整个吸附剂浓度

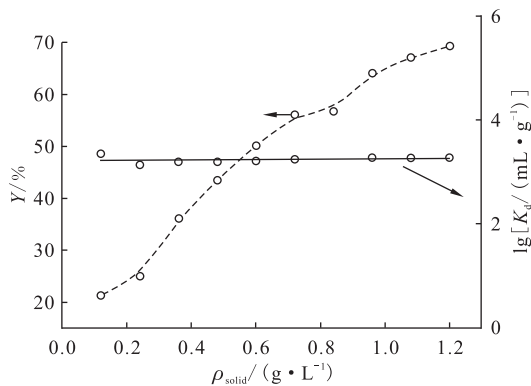


图 3 吸附剂浓度对碳纳米管-乙烯吡啶富集 Co(Ⅱ) 的影响

Fig. 3 Effect of solid content on the pre-concentration of Co(Ⅱ) by MWCNTs-g-VP
 $\rho_0(\text{Co(Ⅱ)}) = 6 \text{ mg/L}$, $\text{pH} = 7.50 \pm 0.02$,
 $c(\text{NaCl}) = 0.01 \text{ mol/L}$, $T = 283 \text{ K}$

范围内无变化,这与分配系数的物理化学特性一致,即 K_d 值在低固液比时与吸附剂浓度无关^[24]。

2.4 离子强度对吸附的影响

离子强度对碳纳米管-乙烯吡啶富集 Co(Ⅱ) 的影响示于图 4。由图 4 可知,随着离子强度的增加,碳纳米管-乙烯吡啶对 Co(Ⅱ) 的富集率下降,说明在此富集过程中存在外层络合作用,此结果与 Shao 等^[9]的研究一致。随着离子强度的增加,由于盐的引入产生表面电荷的屏蔽效应将导致放射性核素与固体表面的静电作用(吸引或排斥)减小^[25]。同时 Na^+ 的存在,将与 Co(Ⅱ) 竞争吸附位,导致 Co(Ⅱ) 的有效吸附位减少,降低 Co(Ⅱ) 的富集率。离子强度对

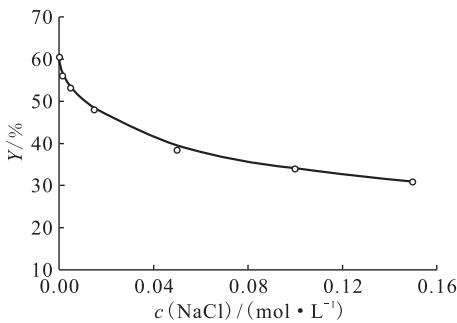


图 4 NaCl 对碳纳米管-乙烯吡啶富集 Co(Ⅱ) 的影响

Fig. 4 Effect of the concentrations of NaCl on the pre-concentration of Co(Ⅱ) by MWCNTs-g-VP
 $\rho_0(\text{Co(Ⅱ)}) = 6 \text{ mg/L}$, $\rho_{\text{solid}} = 0.6 \text{ g/L}$,
 $\text{pH} = 7.50 \pm 0.02$, $T = 283 \text{ K}$

Co(Ⅱ) 在碳纳米管-乙烯吡啶上的富集有影响,说明存在外层络合物。

3 结 论

通过对碳纳米管进行功能化处理制备得到的碳纳米管-乙烯吡啶复合材料对 Co(Ⅱ) 具有良好的富集效果。基于本工作的实验结果,可得出以下结论:

(1) Co(Ⅱ) 在碳纳米管-乙烯吡啶上的富集受 pH 值和离子强度的影响,说明吸附机理包括外层络合和内层络合;

(2) 乙烯吡啶的引入不仅能改善碳纳米管的分散性,还能提高官能团的含量,使得改性后碳纳米管对 Co(Ⅱ) 的富集率远远高于改性前;

(3) Langmuir 吸附模型拟合实验数据比 Freundlich 模型好,根据 Langmuir 模型推算,1 g 碳纳米管-乙烯吡啶可以富集 13.9 mg 钴。与其他吸附材料相比,碳纳米管-乙烯吡啶具有相对较高的吸附性能,适用于放射性废水中放射性核素的预富集和固化处理。

参考文献:

[1] 李瑞东,侯立安,张志利,等. 碳纳米管-环糊精复合材料对 Eu(Ⅲ) 的吸附[J]. 原子能科学技术,2010, 44(9): 1 043-1 046.
[2] Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon[J]. Nature, 1991, 354: 56-58.
[3] Hussain C M, Saridara C, Mitra S. Modifying the Sorption Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes via Covalent Functionalization[J]. Analyst, 2009, 134: 1 928-1 933.
[4] Rao G P, Lu C, Su F. Sorption of Divalent Metal Ions From Aqueous Solution by Carbon Nanotubes: a Review[J]. Sep Purif Technol, 2007, 58: 224-231.
[5] Yang K, Xing B. Adsorption of Organic Compounds by Carbon Nanomaterials in Aqueous Phase: Polanyi Theory and Its Application[J]. Chem Rev, 2010, 110: 5 989-6 008.
[6] Lu C, Chiu H. Chemical Modification of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Sorption of Zn^{2+} From Aqueous Solution[J]. Chem Eng J, 2008, 139: 462-468.
[7] 刘淑娟,李金英,罗明标,等. 纯化及羧化多壁碳纳米管吸附铀的研究[J]. 核化学与放射化学,2011, 33(5): 285-290.

- [8] Tan Z Q, Abe H, Naito M, et al. Arrangement of Palladium Nanoparticles Templated by Supramolecular Self-Assembly of SDS Wrapped on Single-Walled Carbon Nanotubes [J]. Chem Commun, 2010, 46: 4 363-4 365.
- [9] Shao D D, Ren X M, Hu J, et al. Preconcentration of Pb^{2+} From Aqueous Solution Using Poly(Acrylamide) and Poly(N,N-Dimethylacrylamide) Grafted Multiwalled Carbon Nanotubes [J]. Colloids Surf A, 2010, 360: 74-84.
- [10] Shao D, Jiang Z, Wang X. SDBS Modified XC-72 Carbon for the Removal of $Pb(II)$ From Aqueous Solutions[J]. Plasma Processes Polym, 2010(7): 552-560.
- [11] Malynych S, Luzinov I, Chumanov G. Poly(Vinyl Pyridine) as a Universal Surface Modifier for Immobilization of Nanoparticles [J]. J Phys Chem B, 2002, 106: 280-1 285.
- [12] Ren X M, Shao D D, Zhao G X, et al. Plasma Induced Multiwalled Carbon Nanotube Grafted With 2-Vinylpyridine for Preconcentration of $Pb(II)$ From Aqueous Solutions[J]. Plasma Process Polym, 2011(8): 589-598.
- [13] Xu D, Tan X L, Chen C C, et al. Removal of $Pb(II)$ From Aqueous Solution by Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes[J]. J Hazard Mater, 2008, 154: 407-416.
- [14] Allender C J, Castell O K, Davies P R, et al. A Glimpse of the Inner Workings of the Template Site[J]. Chem Comm, 2009(2): 165-167.
- [15] Guo Z Q, Li Y, Zhang S W, et al. Enhanced Sorption of Radiocobalt From Water by $Bi(III)$ Modified Montmorillonite; a Novel Adsorbent[J]. J Hazard Mater, 2011, 192: 168-175.
- [16] Langmuir I. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum[J]. J Am Chem Soc, 1918, 40: 1 361-1 403.
- [17] Freundlich H. Concerning Adsorption in Solutions[J]. Z Phys Chem, 1906, 57: 385-470.
- [18] Stafiej A, Pyrzynska K. Adsorption of Heavy Metal Ions With Carbon Nanotubes[J]. Sep Purif Technol, 2007, 58: 49-52.
- [19] Jaramillo J, Gomez-Serrano V, Alvarez P M. Enhanced Adsorption of Metal Ions Onto Functionalized Granular Activated Carbons Prepared From Cherry Stones[J]. J Hazard Mater, 2009, 161: 670-676.
- [20] Al-Degs Y S, El-Barghouthi M I, Issa A A, et al. Sorption of $Zn(II)$, $Pb(II)$, and $Co(II)$ Using Natural Sorbents; Equilibrium and Kinetic Studies[J]. Water Res, 2006, 40: 2 645-2 658.
- [21] Tan L Q, Jin Y L, Chen J, et al. Sorption of Radiocobalt(II) From Aqueous Solutions to Na-Attapulgite[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2011, 289: 601-610.
- [22] Padala A N, Bhaskarapillai A, Velmurugan S, et al. Sorption Behaviour of $Co(II)$ and $Cu(II)$ on Chitosan in Presence of Nitrilotriacetic Acid[J]. J Hazard Mater, 2011, 191: 110-117.
- [23] Liu M, Chen C, Hu J, et al. Synthesis of Magnetite/Graphene Oxide Composite and Application for Cobalt(II) Removal[J]. J Phys Chem C, 2011, 115: 25 234-25 240.
- [24] 邵大东, 许笛, 王所伟, 等. pH 值和离子强度对放射性核素镍在 MX-80 黏土上的吸附影响和模型研究[J]. 中国科学, 2008, 38: 1 025-1 034.
- [25] López-Ramón V, Moreno-Castilla C, Rivera-Utrilla J, et al. Ionic Strength Effects in Aqueous Phase Adsorption of Metal Ions on Activated Carbons[J]. Carbon, 2003, 41: 2020-2022.