

马军, 杨晶晶, 赵吉. 2009 ABTS 显色分光光度法测定水中微量高锰酸钾 [J]. 环境科学学报, 29(3): 668-672

Ma J Yang J J Zhao J. 2009. Spectrophotometric determination of trace KMnO_4 in water with 2, 2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(3): 668-672

ABTS 显色分光光度法测定水中微量高锰酸钾

马军^{1*}, 杨晶晶¹, 赵吉²

1 哈尔滨工业大学, 城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090

2 东北电力大学应用化学系, 吉林 132012

收稿日期: 2008-05-09 录用日期: 2009-01-12

摘要: 基于 KMnO_4 与 2, 2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) (ABTS) 反应产生的绿色自由基在 415 nm 处有最大吸收值, 建立了一种利用分光光度计测定水中低浓度 KMnO_4 ($0 \sim 4.66 \mu\text{mol L}^{-1}$) 的方法. 在 $\text{pH} = 2.1$, ABTS 过量 ($28.4 \mu\text{mol L}^{-1}$) 的条件下, KMnO_4 与 ABTS 反应的化学计量关系为 1:5 产生的绿色自由基能够稳定存在, 其在波长 415 nm 处的摩尔吸收系数为 $\epsilon = (3.34 \pm 0.04) \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. 该方法对高锰酸钾的检测限(置信区间 90%) 为 $0.01 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($1.6 \mu\text{g L}^{-1}$, 以 KMnO_4 计).

关键词: 高锰酸钾; ABTS 水处理; 分光光度法

文章编号: 0253-2468(2009)03-668-05 中图分类号: X830.2 文献标识码: A

Spectrophotometric determination of trace KMnO_4 in water with 2, 2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate)

MA Jun^{1*}, YANG Jingjing¹, ZHAO Ji²

1 National Engineering Research Center of Urban Water Resources, State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

2 Department of Applied Chemistry, Northeast Dianli University, Jilin 132012

Received 9 May 2008 accepted 12 January 2009

Abstract A new method for the determination of concentrations ($0 \sim 4.66 \mu\text{mol L}^{-1}$) of permanganate in water was established. The method is based on the reaction of permanganate with ABTS, 2, 2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), which forms a green radical cation (ABTS^{•+}) that can be measured spectrophotometrically at a wavelength of 415 nm. The reaction between permanganate and ABTS has a stoichiometry of 1:5 in excess ABTS ($28.4 \mu\text{mol L}^{-1}$). The absorbance at 415 nm has a good linear relationship with permanganate ($0 \sim 4.66 \mu\text{mol L}^{-1}$) in phosphate buffered solution ($\text{pH} = 2.1$), with a molar absorptivity, $\epsilon = (3.34 \pm 0.04) \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. A detection limit of about $0.01 \mu\text{mol L}^{-1}$ of KMnO_4 ($1.6 \mu\text{g L}^{-1}$ as KMnO_4) can be achieved with a 5 cm optical path with a 90% confidence interval.

Keywords potassium permanganate; ABTS; water treatment; spectrophotometric method

1 引言 (Introduction)

作为一种环境友好的氧化剂, KMnO_4 被广泛地应用于水处理过程的氧化、混凝、杀菌当中 (Moyers *et al.*, 1985). 研究表明, KMnO_4 不仅可以通过氧化氯代烯烃 (如 PCE, TCE, DCEs) 脱氯修复地下水 (Huang *et al.*, 2001), 而且可以有效地抑制地表水中藻类的繁殖 (Liang *et al.*, 2008). 实验证明, KMnO_4 还能够有效地去除蓝藻产生的藻毒素 (Ma

et al., 1996), 对藻类代谢产物的臭味也有良好的去除作用 (Dietrich *et al.*, 1995). 同时, KMnO_4 用作氧化剂和助凝剂能够降低 THMs 前体物浓度 (Ma *et al.*, 1996).

尽管 KMnO_4 在水处理中的应用潜力很大, 但只有少数方法能够测定水中的 KMnO_4 浓度. 高浓度的 KMnO_4 可以通过草酸钠滴定法来确定, 但耗时长. 在波长 525 nm 处直接读取吸光度值这一方法被广泛地用于测定水中 KMnO_4 浓度, 它虽然简便, 但其摩

基金项目: 教育部科技创新重大项目培育基金资助项目 (No. 705013)

Supported by the Ministry of Education of China (No. 705013)

作者简介: 马军 (1962-), 男, 教授 (博士), E-mail: majun_hi@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: MA Jun (1962-), male, professor (Ph.D.), E-mail: majun_hi@163.com; * Corresponding author

尔吸收系数较低 ($2300 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), 最低检测限高 (采用 5 cm 比色皿测定, $0.36 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) (Richard^s 1930). 国内有报道关于利用 KMnO_4 与偶氮胂的褪色反应测定其浓度的方法 (万昆等, 2005), 其检测限可以达到 $0.18 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 但必须在硫酸介质中反应.

本文试图基于 KMnO_4 与 ABTS (2, 2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)) 的反应建立一种操作简便、高灵敏度、低检测限的测定水中 KMnO_4 的方法. ABTS 是一种过氧化氢酶的底物, ABTS/ABTS^{•+} 的氧化还原电位为 0.68 V , 容易发生电子转移, 生成稳定的绿色自由基 ABTS^{•+}, 如图 1 所示 (Scott *et al.*, 1993). 食品工业中利用氧化产生的 ABTS^{•+} 的褪色反应测定果蔬中酚类化合物的抗氧化能力 (Nenadis *et al.*, 2004; 朱玉昌等, 2005). 而 ABTS 已经被用于过氧羧酸 (Pinkemell *et al.*, 1997)、氯和溴的种属 (Pinkemell *et al.*, 2000) 以及高铁的测定 (Lee *et al.*, 2005a), 并且 ABTS 法测定高铁已经被成功用于高铁氧化酚类物质的动力学研究 (Lee *et al.*, 2005b).

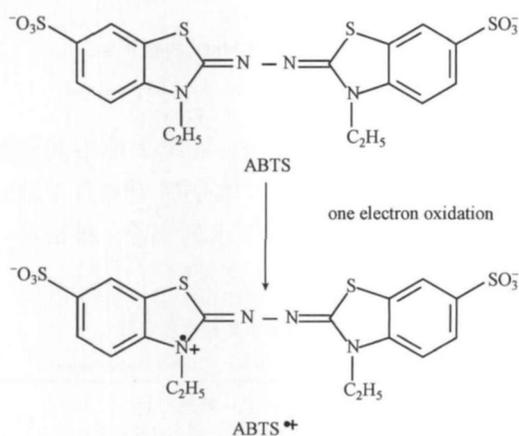


图 1 ABTS 及其电子氧化产物 ABTS^{•+}

Fig. 1 ABTS and its one-electron oxidation product ABTS^{•+}

2 实验材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料及仪器

超纯水来自 Milli-Q 系统. 除特别说明外, 所有试剂均为分析纯. 将 0.13 g ABTS 铵盐溶于 100 mL 超纯水中形成 $2.37 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 ABTS 储备液, 在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下储存, 当储备液吸光度值较高时 (波长 415 nm , 在 5 cm 比色皿中吸光度为 0.02), 需重新配置. $\text{pH} = 2.1$ 磷酸缓冲液 ($0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 由

$13.465 \text{ g N a H}_2\text{P O}_4$ 和 $7.8 \text{ mL H}_3\text{P O}_4$ (85%) 溶于 1 L 超纯水制得. 3.2 g KMnO_4 溶于 1 L 蒸馏水中并煮沸 2 h 以充分去除还原性物质, 得到 KMnO_4 储备液; 工作液使用时进行稀释, 在 525 nm 波长下吸光度标定 KMnO_4 浓度. 自由氯溶液采用次氯酸钠配制 (10%), 其浓度用碘量法确定.

利用 UV-752 型分光光度计 (山东高密产) 测定 ABTS 法吸光度 (采用 1 或 5 cm 石英比色皿). 用校准过的 PB-10 pH 计 (德国赛多利斯) 控制 pH.

2.2 以天然水体为本底的测定

采用 2 种不同来源的天然水体评价 ABTS 法在天然水中测定 KMnO_4 浓度的可行性, 两种水经过孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维膜过滤后在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冷藏.

2.3 实验过程

ABTS 法测定 KMnO_4 的步骤如下: 将 5 mL 磷酸缓冲液 ($\text{pH} = 2.1$, $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 0.3 mL ABTS 溶液 ($2.37 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 加入到 25 mL 比色管中, 然后加入 KMnO_4 溶液振荡、定容至 25 mL ABTS 绿色自由基产生后用适当的石英比色皿 (1 或 5 cm) 在 415 nm 波长进行测定 (反应迅速, 充分混合后立即生成稳定的绿色自由基, 可以马上测定), 并进行空白校正. KMnO_4 浓度可以通过比尔-郎伯定律从 415 nm 波长下的吸光度计算得出:

$$[\text{KMnO}_4] = \Delta A_{415}^{415} V_{\text{final}} / (\epsilon l V_{\text{sample}}) \quad (1)$$

其中, ΔA_{415}^{415} 为 415 nm 波长处经过校准的样品吸光度; l 为比色皿光程, cm ; ϵ 为摩尔吸收系数, (3.34 ± 0.04) $\times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$; V_{final} 为定容后的体积, mL ; V_{sample} 为加入 KMnO_4 的体积, mL .

ABTS 和 KMnO_4 反应标准曲线绘制: 向一系列含有缓冲液和 ABTS 的 25 mL 比色管中加入不同量的 KMnO_4 , 在 415 nm 波长处测定吸光度. KMnO_4 浓度 ($0 \sim 4.66 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 通过在 525 nm 波长处测定其吸光度而得到, 浓度低于 $0.36 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时不能准确测定, 通过工作液吸光度及其稀释倍数确定.

ABTS^{•+} 在 415 nm 波长处的摩尔吸收系数通过碘离子催化 ABTS 和氯的反应确定. 研究表明, 1 mol Cl_2 与 2 mol ABTS 反应产生 $2 \text{ mol ABTS}^{\bullet+}$ (Pinkemell *et al.*, 2000).

天然水体中 KMnO_4 浓度的测定: 向 1 L 天然水里加入 50 mL $\text{pH} = 2.1$ 的磷酸缓冲液和过量的 50 mL ABTS 溶液搅拌 4 h 然后将 KMnO_4 按比例投加到 25 mL 充满上述溶液的比色管中.

3 实验结果 (Results)

3.1 ABTS^{•+} 的吸收光谱

图 2 显示了 ABTS 与不同剂量 KMnO_4 反应后的吸收光谱. ABTS^{•+} 自由基有 4 个最大吸收峰 (415 nm, 650 nm, 732 nm, 820 nm), 这与其他研究者的结果一致 (Scott *et al.*, 1993; Pinkemell *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2005a). 由于 ABTS^{•+} 在 415 nm 波长处的吸光度最大, 因此, 本文采用 415 nm 处的吸光度值. 吸收曲线的形状和最大吸收波长 λ_{max} 不随 KMnO_4 剂量变化而改变.

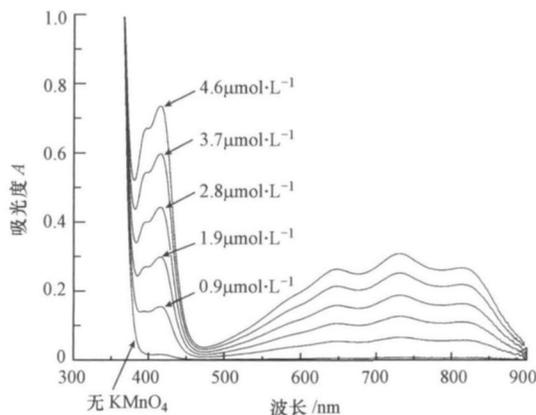


图 2 不同浓度的 KMnO_4 与 ABTS 反应后的吸收光谱

Fig 2 Absorption spectra of the ABTS reagent after reaction with different concentrations of KMnO_4

3.2 灵敏度和精确度

3.2.1 纯水中 ABTS 法测定 KMnO_4 的标准曲线

图 3 表明, ABTS^{•+} 的吸光度随着 KMnO_4 浓度增加而增大. KMnO_4 在 2 个浓度范围内 ($0 \sim 0.46 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0 \sim 4.66 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的所有标准曲线都为线性 ($R^2 > 0.99$, $n = 24$ 条), 并且其斜率几乎相同 (偏差小于 2%). 因为 ABTS 在 415 nm 波长处有自吸收 ($\approx 0.004 \text{ cm}^{-1}$), 标准曲线在空白校正后经过原点. 每摩尔浓度 KMnO_4 在 415 nm 处引起的吸光度变化为 $(16.60 \pm 0.03) \times 10^4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 其灵敏度高, 且置信区间为 90% 的检测限为 $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ ($1.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 以 KMnO_4 计). 与偶氮胂测定 KMnO_4 浓度的方法相比, 不仅灵敏度高出 7 倍多, 检测限也低了一个数量级 (万昆等, 2005).

3.2.2 以天然水体为本底 KMnO_4 浓度的测定 与纯水相比, 天然水体中含有天然有机物以及各种无机离子, 而其中的一些物质还具有一定的氧化还原能力, 可能会干扰 ABTS 法的测定. 因此, 为了考察

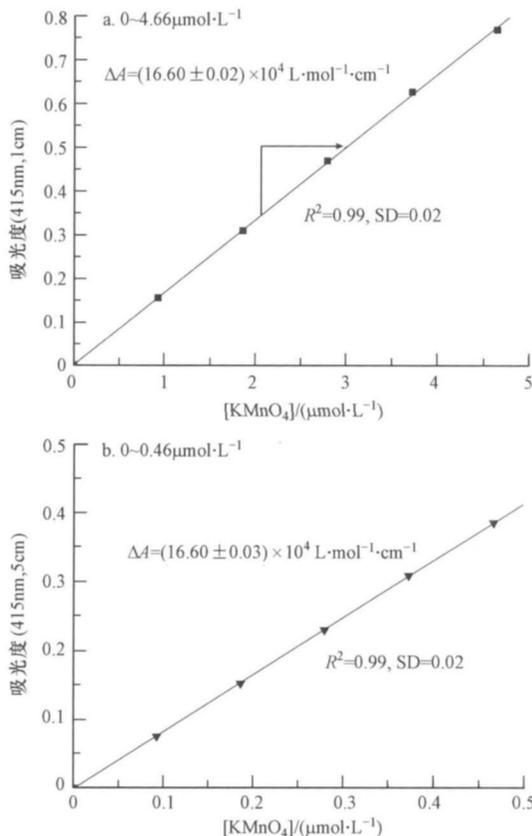


图 3 ABTS 法测定 KMnO_4 的标准曲线

Fig 3 Standard curves for the ABTS method

水中杂质对 ABTS 法的影响, 采用 2 种不同天然水体来进行评价. 2 种天然水体分别是来自于北京某净水厂进水 (地表水和地下水的混合) 和松花江原水, 其基本水质指标如表 1 所示.

表 1 两种天然水体的水质参数

Table 1 Water quality index of two natural waters

水样	DOC / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱度 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以 CaCO_3 计)	pH 值
北京某净水厂进水	6.58	175	8.19
松花江原水	6.77	82	7.88

在 2 种不同来源的天然水 (某净水厂进水和松花江原水) 中, 用 ABTS 法测定 KMnO_4 的标准曲线与在超纯水中的标准曲线进行对比, 如图 4a 和图 4b 所示. 由图可知, 尽管在天然水中水样的空白值较高, 但其斜率与超纯水中的数值相同. 这一结果表明, 天然水体对 ABTS 法测定 KMnO_4 基本没有影响, 但由于水中存在的一些氧化性物质与 ABTS 反应, 导致空白值较高. 从图 4 还可以看出, 松花江原水的空白吸光度明显比北京某净水厂进水高, 这意味着

松花江原水中含有的氧化性物质比北京某净水厂进水更多一些。

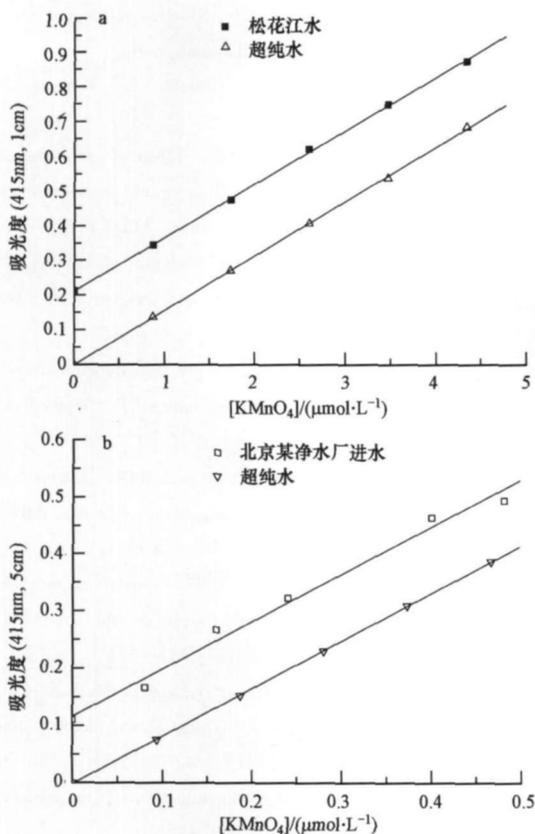


图4 两种天然水体中 ABTS法测定 KMnO_4

Fig. 4 Standard curves for the ABTS method to determine KMnO_4 in different raw waters

3.3 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 产生的化学计量关系

ABTS法的化学计量关系 ($\Delta[\text{ABTS}^{\cdot+}] / \Delta[\text{KMnO}_4]$) 可以由该方法的灵敏度 ($\Delta A^{415} / \Delta[\text{KMnO}_4] = 16.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$) 除以 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 在 415 nm 波长处的摩尔吸收系数 ($\Delta A^{415} / \Delta[\text{ABTS}^{\cdot+}] = \epsilon_{\text{ABTS}^{\cdot+}, 415 \text{ nm}}$) 获得。而 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 在 415 nm 波长处的摩尔吸收系数可以通过氯和 ABTS 反应产生已知浓度的 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 计算得出 (Pinkerell *et al.*, 2000)。在本文中经过计算得到 $\epsilon_{\text{ABTS}^{\cdot+}, 415 \text{ nm}} = (3.34 \pm 0.04) \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 这与报道的在 pH 为 0 波长为 417 nm 条件下测得的摩尔吸收系数 $(3.47 \pm 0.04) \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的结果相似 (Scott *et al.*, 1993)。

由于 KMnO_4 在不同的 pH 条件下被还原后生成的产物不同, 转移的电子数目也不同, 从而会影响 ABTS 和 KMnO_4 的化学计量数, 故需要在 pH = 2~7 的条件下进行试验, 以确定 ABTS 法适用范围。从图

5可以看出, 当 pH 在 2~4 之间变化时化学计量关系为 $\text{ABTS}:\text{KMnO}_4 = 5:1$, 这是由于在 pH 不大于 4 的条件下, KMnO_4 转移 5 个电子变成 Mn^{2+} , 如反应 (2) 所示。但是, 当 pH 处于 4~7 之间时化学计量关系略小于 4, 这是因为此时不仅会发生反应 (2), 还会发生 KMnO_4 转移 3 个电子变成 MnO_2 的反应 (反应 (3)) (Damm *et al.*, 2002), 正是因为反应 (2) 和 (3) 都会发生, 才导致其化学计量数略小于 4。另外, 由于生成的新生态的 MnO_2 具有很强的吸附能力 (张立珠等, 2006), 它会吸附 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 导致吸光度随着时间的延长不断降低, 从而不利于 KMnO_4 浓度的准确测定。因此, ABTS 法测定 KMnO_4 浓度的最佳 pH 值范围为 2~4。

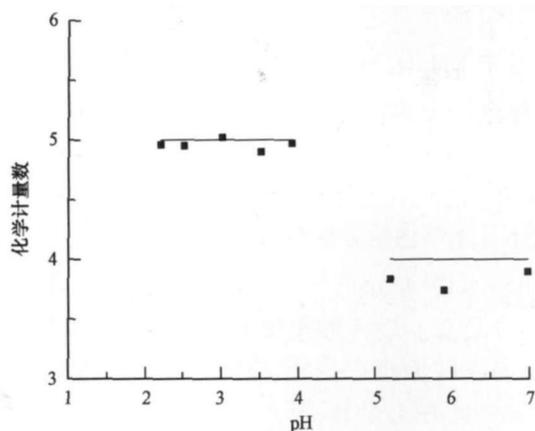
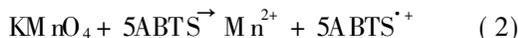


图5 pH对 KMnO_4 -ABTS反应化学计量关系的影响

Fig. 5 Stoichiometric factor for KMnO_4 -ABTS reaction as a function of pH

3.4 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 的稳定性

在超纯水中 pH = 2.1 条件下 KMnO_4 ($0.52 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 产生的 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 很稳定, 在 10h 时间内吸光度的衰减小于 5%, 这与报道中在 pH = 4.3 条件下高铁产生的 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 的稳定性一致 (Lee *et al.*, 2005a)。本实验进一步检测 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 在两种天然水中的稳定性, 结果如图 6 所示 (以松花江水和北京某净水厂进水为本底时 KMnO_4 投量分别为 $3.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.48 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。结果显示, pH = 2.1 条件下 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 在波长 415 nm 处吸光度 2 h 后在松花江原水和北京某净水厂进水中分别降低 0.46% 和 3.4%。尽管 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 在天然水体中不如在超纯水中稳定, 但仍有充足的时间进行准确测定。

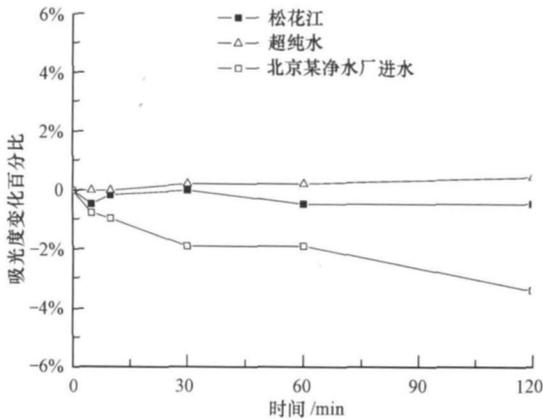


图 6 在超纯水和天然水体中 $ABTS^+$ 的稳定性

Fig 6 Stability of $ABTS^+$ generated from $KMnO_4$ present in natural waters and distilled water

4 结论 (Conclusions)

基于 $KMnO_4$ 与 $ABTS$ 反应在 415 nm 处产生稳定的绿色自由基, 建立了一种新的测定水中 $KMnO_4$ 的方法, 其特点如下: ①检测浓度低, 在 $0.01 \sim 4.66 \mu\text{mol L}^{-1}$ 之间有良好的线性关系; 灵敏度高, 每摩尔 $KMnO_4$ 在 415 nm 处产生的吸光度变化为 $(16.60 \pm 0.03) \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. ②该方法操作简单, 耗时少, 并且在 $\text{pH} < 4$ 时不受 $KMnO_4$ 浓度及水体的影响, 容易在实验室内执行. ③ $ABTS$ 可以稳定存在, 至少能够储存 1 个月. 其产生的 $ABTS^+$ 在超纯水和天然水中都能稳定存在, 给检测者留以充足的时间进行测定.

责任作者简介: 马军 (1962—), 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授, 哈尔滨工业大学博士生导师.

参考文献 (References):

Damm J H, Hardacre C, Kalin R M, *et al* 2002 Kinetics of the oxidation of methyl-tert-butyl ether (MTBE) by potassium permanganate [J]. *Water Res* 36: 3638—3646

Dietrich A M, Hoehn R C, Dufresne L C, *et al* 1995 Oxidation of odorous and nonodorous algal metabolites by permanganate, chlorine, and chlorine dioxide [J]. *Water Sci Technol* 31(11): 223—228

Huang K C, Hoag G E, Chheda P, *et al* 2001 Oxidation of chlorinated ethenes by potassium permanganate: a kinetics study [J]. *J Hazard Mater* B87: 155—169

Lee Y, Yoon J Y, von Gunten U. 2005a Spectrophotometric determination of ferrate ($Fe(VI)$) in water by $ABTS$ [J]. *Water Res* 39: 1946—1953

Lee Y, Yoon J Y, von Gunten U. 2005b Kinetics of the oxidation of phenols and phenolic endocrine disruptors during water treatment with ferrate ($Fe(VI)$) [J]. *Environ Sci Technol* 39: 8978—8984

Liang H, Yang Y L, Gong W J, *et al* 2008 Effect of pretreatment by permanganate/chlorine on algae fouling control for ultrafiltration (UF) membrane system [J]. *Desalination* 222(5): 74—80

Ma J, Graham N. 1996 Controlling the formation of chloroform by permanganate preoxidation-destruction of precursor [J]. *Water SRT-Aqua* 45(6): 308—309

Moyers Betty, Wu Jy S. 1985 Removal of organic precursors by permanganate oxidation and alum coagulation [J]. *Water Res* 19(3): 209—314

Nenadis N, Wang L F, Tsimidou M, *et al* 2004 Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the $ABTS^+$ assay [J]. *Agric Food Chem*, 52: 4669—4673

Pinknell U, Lake H J, Karst U. 1997 Selective photometric determination of peroxy-carboxylic acids in the presence of hydrogen peroxide [J]. *Analyst* 122: 567—571

Pinknell U, Nowack B, Galkard H, *et al* 2000 Methods for the photometric determination of reactive bromine and chlorine species with $ABTS$ [J]. *Water Res* 34(18): 4343—4350

Richards M B. 1930 Colorimetric determination of manganese in biological material [J]. *Analyst* 55: 554

Rodríguez E M, Acero J L, Spool L, *et al* 2008 Oxidation of MC-LR and RR with chlorine and potassium permanganate: Toxicity of the reaction products [J]. *Water Res* 43: 1744—1752

Scott S L, Chen W J, Espenson B A, *et al* 1993 Spectroscopic parameters, electrode potentials, acid ionization constants, and electron exchange rates of the 2, 2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonate) radicals and ions [J]. *J Phys Chem*, 97(25): 6710—6714

万昆, 陆茜. 2005 高灵敏分光光度法测定微量锰 (VII) [J]. *江汉大学学报*, 31(1): 32—33

Wan K, Lu Q. 2005 Study on high sensitive spectrophotometric determination of micro manganese (VII) [J]. *Journal of Jianghan University (Natural Science)*, 33(1): 32—33 (in Chinese)

张立珠, 马军, 陈忠林, 等. 2006 水溶液中新生态 MnO_2 对苯酚的吸附作用 [J]. *化工学报*, 57(12): 2959—2963

Zhang L Z, Ma J, Chen Z L, *et al* 2006 Adsorption of phenol by MnO_2 formed in situ [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 57(12): 2959—2963 (in Chinese)

朱玉昌, 焦必宁. 2005 $ABTS$ 法体外测定果蔬类总抗氧化能力的研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 31(8): 77—80

Zhu Y C, Jiao B N. 2005 Research progress on $ABTS$ assay in determination of TAA in fruits and vegetables in vitro [J]. *Food and Fermentation Industries* 31(8): 77—80 (in Chinese)