

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究

陈金媛, 方金凤, 魏秀珍*

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014)

摘要: nTiO₂ 进入水环境后, 其存在形态及环境行为主要受水环境因素影响. 以 P25 nTiO₂ 为研究对象, 通过改变 nTiO₂ 悬浊液的 pH 值、电解质和表面活性剂种类, 分析了 nTiO₂ 的分散、团聚及沉降行为. 结果表明, pH 通过改变 nTiO₂ 颗粒的 Zeta 电位影响 nTiO₂ 在水中的稳定性, 等电点附近 nTiO₂ 发生显著聚沉. nTiO₂ 颗粒选择性吸附 AlCl₃、CaCl₂、NaCl 及 Na₂SO₄ 电离产生的荷电离子, 阳离子的吸附中和了 TiO₂ 颗粒表面的负电荷, 导致颗粒急速聚沉; 阴离子的吸附使颗粒间静电斥力增强, 颗粒稳定存在于水中. 不同类型的表面活性剂通过改变 nTiO₂ 颗粒表面性质, 增强 nTiO₂ 颗粒在水中的稳定性. 运用 DLVO 理论建立了 nTiO₂ 的势能方程, 势能曲线拟合结果表明, 水环境条件通过影响颗粒间势能大小影响 nTiO₂ 在水中的分散沉降行为.

关键词: nTiO₂; 表面活性剂; 分散; 沉降; 势能曲线

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3933-07

Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO₂ in Aquatic System

CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The existing form and environmental behavior of nTiO₂ in aquatic system are mainly affected by environmental factors. The dispersion and deposition behavior of nTiO₂ was investigated by changing pH values of the suspension liquid and adding electrolytes and surfactants using P25 nano-TiO₂ as the research object. The results indicated that the pH value obviously affected the stability of nTiO₂ by changing the charge distribution on the nTiO₂ particles. TiO₂ nanoparticles were highly aggregated to deposit when the pH value was close to the isoelectric point. The characteristic adsorption ion of AlCl₃, CaCl₂, NaCl and Na₂SO₄ after ionization on the surface of nTiO₂ particles varied from each other. The adsorption of cations neutralized the negative charge on the surface of nTiO₂ particles which led to the quick aggregation and deposition of nTiO₂ particles. The adsorption of anions improved the stability of nTiO₂ particles in water by increasing electrostatic repulsion between TiO₂ particles. Surfactants would adsorb onto the surface of nTiO₂ particles and enhance the stability of nTiO₂ by changing the surface properties of the nanoparticles. The potential energy of nTiO₂ particles were simulated by the DLVO theory. The simulative potential energy curve confirmed that the change of relevant water environment conditions led to the change of potential energy of nTiO₂ particles, which determined the dispersion and deposition behavior of nTiO₂ particles.

Key words: nTiO₂; surfactants; dispersion; deposition; potential energy curve

纳米二氧化钛 (nano-TiO₂, nTiO₂) 由于独特的电磁、热及光敏特性, 已作为光催化剂、吸收剂、催化剂载体、涂料等, 被大量应用于环境治理、涂料、化妆品等诸多行业^[1~4], 且用量逐年增加. 在生产、使用和废弃过程中, 纳米材料释放进入环境和生态系统^[5,6], 对人类健康和其他生物体造成暴露威胁^[7~11]. 由于纳米尺寸效应, 纳米材料的环境行为与其他颗粒物有明显不同^[6,12~14], 需研究纳米材料释放后产生的环境行为.

研究发现, 纳米材料进入水环境会发生诸如分散、团聚、沉降、迁移、与水中其他污染物相互作用以及向水生生物体积累等行为^[15~19]. nTiO₂ 在水中的分散、团聚、沉降等行为与颗粒自身的性质 (表面电位、组成以及包覆物质)、水环境因素

(pH、离子种类及强度、表面活性剂种类及含量) 和水动力条件等有关^[20~22]. 由于 nTiO₂ 在水中的反应能力及生物毒性由纳米颗粒大小及其稳定性决定^[6,23~25], 研究 nTiO₂ 进入水环境后的分散、团聚、沉降等行为, 有助于了解纳米物质在水环境介质中迁移以及在环境传递过程中对自然生物的影响, 可为纳米生态安全与人类健康风险评估提供科学依据.

本研究通过改变电解质、表面活性剂种类, 调节悬浊液 pH 值等探讨 nTiO₂ 在水环境中的团聚、

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20877070, 21177114)

作者简介: 陈金媛 (1963~), 女, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为环境污染控制、环境污染化学及纳米材料毒理等, E-mail: cjy1128@zjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xzwei@zjut.edu.cn

分散以及沉降行为,并通过势能曲线分析,阐明作用机制,论证了 nTiO_2 在水环境中的迁移、扩散、沉降行为与水环境条件关系。

1 材料与方法

1.1 实验材料

纳米二氧化钛(P25):广州市华力森贸易有限公司,其锐钛型与金红石型含量之比约为 80:20,粉体的平均粒径约为 21 nm。

AlCl_3 、 CaCl_2 、 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaOH :国药集团化学试剂有限公司(分析纯);十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)以及吐温 80(Tween-80):上海晶纯试剂有限公司(纯度 99%);实验用水为去离子水。

1.2 实验方法

nTiO_2 的 Zeta 电位、平均粒径和吸光度的测定:配制一定浓度 nTiO_2 悬浊液,用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸和 NaOH 溶液调节 pH 值,用马尔文 Nano ZS90 型 Zeta 电位仪测定悬浊液中 nTiO_2 的 Zeta 电位和平均粒径;用 TU 1810 型紫外-可见分光光度计测定悬浊液的吸光度 A 。

nTiO_2 的分散行为研究:①向 nTiO_2 悬浊液中添加 AlCl_3 、 CaCl_2 、 NaCl 和 Na_2SO_4 ,配制不同种类不同浓度的电解质- nTiO_2 悬浊液;②向 nTiO_2 悬浊液中添加表面活性剂 SDBS、CTAC、Tween-80,配制不同种类不同浓度的表面活性剂- nTiO_2 悬浊液,测定悬浊液 Zeta 电位、吸光度及平均粒径,研究 nTiO_2 在不同环境条件下的分散行为。

nTiO_2 的沉降行为研究:配制不同浓度、经超声分散的表面活性剂- nTiO_2 悬浊液、电解质- nTiO_2 悬浊液,注入 1 L 量筒中,每隔 12 h 测量悬浊液的吸光度,用吸光度比 (A/A_0) 随着时间的变化曲线表征 nTiO_2 的沉降效果,研究其沉降行为。

2 结果与讨论

2.1 nTiO_2 悬浊液的性质表征

P25 nTiO_2 粉体为球形颗粒,粒径小[图 1(a)],将 nTiO_2 颗粒加入水中制成悬浊液后,由于团聚作用,水中 nTiO_2 颗粒的尺寸明显增大,可以达到几百纳米[图 1(b)]。这是由于 nTiO_2 尺寸小,表面原子占有率高,表面能高,粒子通过相互聚集发生团聚而降低表面能,增加在系统中的稳定性。

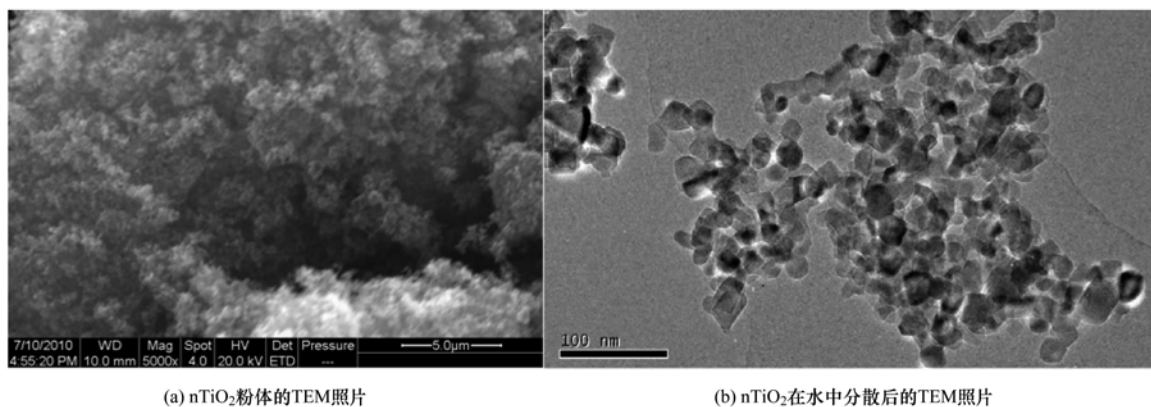


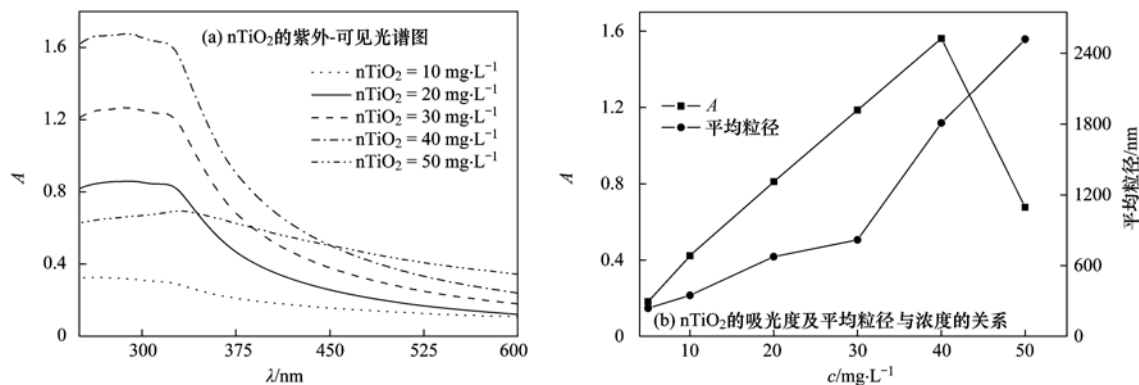
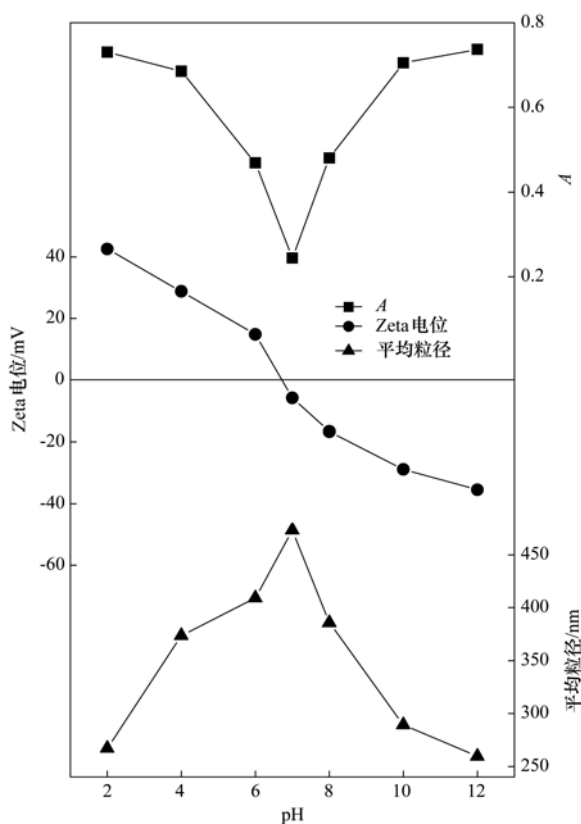
图 1 nTiO_2 的 TEM 照片

Fig. 1 TEM photographs of nTiO_2

经超声分散形成相对稳定的不同浓度 nTiO_2 悬浊液的紫外光谱如图 2(a) 所示。从中可知,后续吸光度测定选取吸收波长为 $\lambda = 325 \text{ nm}$ 。 nTiO_2 悬浊液的吸光度同浓度关系如图 2(b) 所示,当 nTiO_2 的浓度小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,悬浊液的吸光度随浓度的升高而线性增加,遵循方程 $y = 0.03898x + 0.01392$ ($R^2 = 0.9983$)。随着 nTiO_2 浓度的升高, nTiO_2 颗粒间的碰撞几率增加,颗粒发生团聚,粒径不断增大[图 2(b)];而当浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发生严重

团聚,颗粒尺寸急剧增加,导致沉降,悬浊液吸光度急剧下降。

nTiO_2 悬浊液 Zeta 电位随 pH 变化如图 3 所示, nTiO_2 在水中的等电点为 6.7。等电点附近, nTiO_2 颗粒表面电荷接近零,颗粒间的斥力作用最小, nTiO_2 颗粒容易聚集形成大的团聚体^[19,26]。从吸光度粒径变化曲线均可知,pH 值改变对 nTiO_2 悬浊液的吸光度和粒径均有显著影响,说明 pH 改变了 nTiO_2 颗粒在水中的形态。pH = 7 时,接近 nTiO_2 的

图2 nTiO₂ 悬浊液性质表征Fig. 2 Characterization of nTiO₂ suspension liquid图3 pH 对 nTiO₂ 悬浊液性质的影响Fig. 3 Effect of pH value on the character of nTiO₂ suspension liquid.

等电点,此时吸光度有最小值 0.245,粒径有最大值 473 nm,说明此时 nTiO₂ 的分散性最差,颗粒在水中团聚严重.

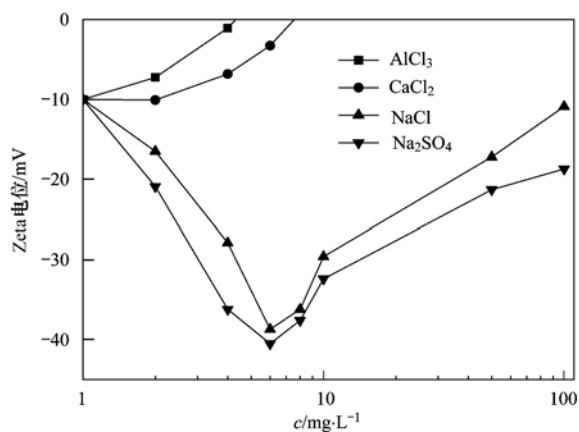
2.2 nTiO₂ 在水中的分散

2.2.1 电解质对 nTiO₂ 分散行为的影响

TiO₂ 是一种两性氧化物,由于 Ti—O 之间的极性较强,使得 TiO₂ 表面易吸附水而极化形成—OH. 将 4 种电解质 (AlCl₃、CaCl₂、NaCl 及 Na₂SO₄) 分别加入 nTiO₂ 悬浊液中,研究电解质对 nTiO₂ 分散行

为的影响,结果如图 4 所示. 从中可以看出,不同种类的电解质引起 nTiO₂ 颗粒的 Zeta 电位发生截然不同的变化,其原因在于电解质电离后在 nTiO₂ 颗粒表面发生选择性吸附的离子不同. 加入 AlCl₃ 和 CaCl₂ 时,nTiO₂ 以吸附 Al³⁺ 和 Ca²⁺ 阳离子为主,价态高的 Al³⁺ 更易中和 nTiO₂ 表面的负电荷,nTiO₂ 的 Zeta 电位趋于零,nTiO₂ 更易于团聚. 加入 NaCl 和 Na₂SO₄ 时,nTiO₂ 特征吸附 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 阴离子,颗粒间的静电斥力作用增强,颗粒难以相互靠近而不易团聚;而当 NaCl 和 Na₂SO₄ 浓度超过一定值(约 6 mg·L⁻¹)时,由于双电层压缩,厚度减小,颗粒间相互接近的能垒降低,nTiO₂ 团聚趋势增强,Zeta 电位的绝对值减小. 即低浓度的 AlCl₃ 和 CaCl₂ 可以抑制 nTiO₂ 在水中的分散,降低 nTiO₂ 在水中的稳定性;对较低浓度的 NaCl 和 Na₂SO₄,nTiO₂ 特征吸附 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 后,Zeta 电位升高,颗粒间势垒增大,颗粒难以越过势垒发生团聚;浓度超过 6 mg·L⁻¹ 后,系统稳定性降低.

2.2.2 表面活性剂对 nTiO₂ 分散行为的影响

图4 不同种类电解质对 nTiO₂ Zeta 电位的影响Fig. 4 Effect of electrolytes on nTiO₂ Zeta potential

在 nTiO_2 悬浊液中添加不同类型的表面活性剂,研究其对 nTiO_2 分散行为的影响,结果如图 5 所示. 添加表面活性剂后,悬浊液的吸光度在一定程度上有所增加,Zeta 电位绝对值增加,颗粒平均粒径减小,团聚的颗粒又得到分散,说明 3 种类型的表面活性剂均能改善 nTiO_2 在水中的分散性能,增加 nTiO_2 在水中的稳定性. 表面活性剂分子主要是通过通过对 nTiO_2 的吸附,降低 nTiO_2 颗粒表面能,增加空间位阻,消除静电作用的影响,改善 nTiO_2 在水中的分散效果.

离子型表面活性剂加入系统后,离子在 nTiO_2

颗粒表面吸附使颗粒带电,粒子间产生静电斥力, nTiO_2 趋于稳定. 低浓度的离子型表面活性剂 SDBS 和 CTAC 在 nTiO_2 颗粒表面通常发生单层吸附,浓度较高时,表面活性剂分子或离子在 nTiO_2 表面发生多层吸附^[27,28],此时表面活性剂分子或离子的憎水链相互连结,导致颗粒发生团聚而失稳. 非离子型表面活性剂 Tween-80 对 nTiO_2 颗粒的分散主要依靠空间位阻稳定作用,通过表面活性剂分子的憎水作用吸附提供空间壁垒,在颗粒周围建立一层物质屏障,阻止纳米颗粒相互靠近,使颗粒分散. 增加非离子型表面活性剂的浓度,颗粒表面有可能发生

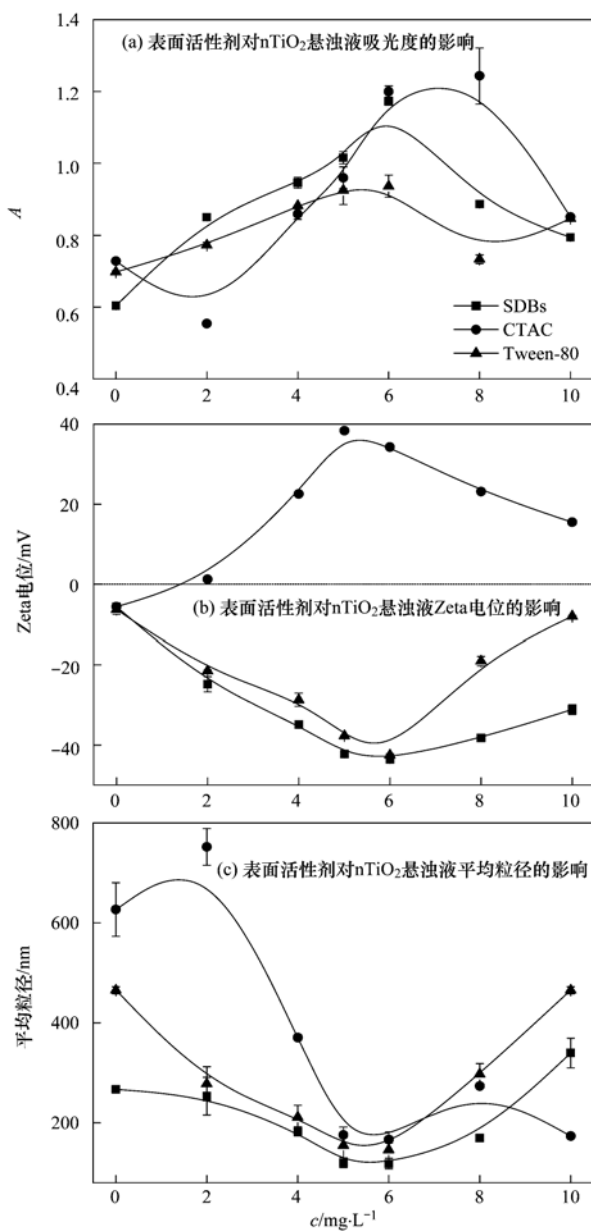


图 5 表面活性剂对 nTiO_2 分散的影响

Fig. 5 Effect of different kinds of surfactants on the suspension of nTiO_2

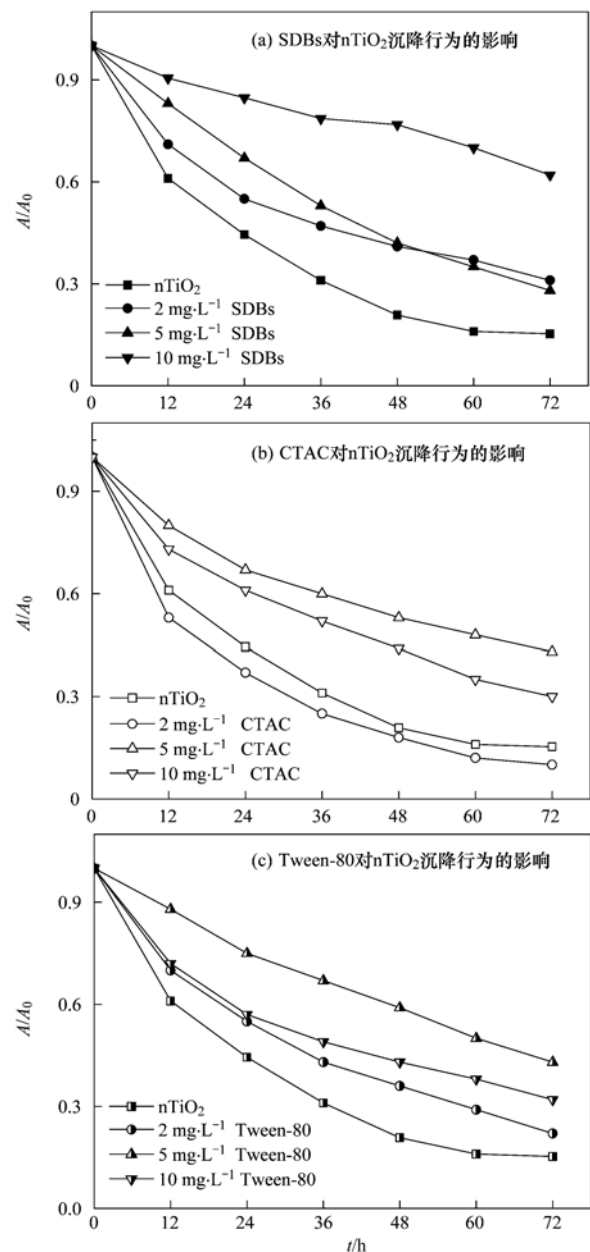


图 6 nTiO_2 沉降曲线

Fig. 6 Sedimentation behavior of nTiO_2

多层吸附,也导致 nTiO₂ 颗粒在水中失稳而团聚。

当 nTiO₂ 分散在去离子水中时,颗粒表面带负电。而 CTAC 是一种阳离子型表面活性剂,加入少量 CTAC, nTiO₂ 颗粒表面的负电荷被 CTAC 电离产生的表面活性剂阳离子中和,颗粒间的静电斥力作用减弱甚至消除, nTiO₂ 的 Zeta 电位绝对值减小并趋近于零[图 5(b)]。继续增大 CTAC 的浓度,呈电中性的 nTiO₂-CTAC 粒子上再吸附上第二层 CTAC 离子, nTiO₂ 颗粒重新荷上相反电荷,颗粒又因静电斥力重新分散。

2.3 nTiO₂ 在水中的沉降行为

将 SDBS、CTAC 和 Tween-80 加入 nTiO₂ 中,分别制成浓度为 2、5、10 mg·L⁻¹ 的悬浊液,研究表面活性剂种类对 nTiO₂ 沉降行为的影响,结果如图 6 所示。加入不同表面活性剂后 nTiO₂ 的沉降速率均有所减缓,说明表面活性剂提高了 nTiO₂ 在水中的稳定性。由于 nTiO₂ 颗粒的亲水性,表面活性剂极易在颗粒表面吸附,产生的双电层斥力作用和空间壁垒作用抑制了颗粒的团聚,使 nTiO₂ 稳定地分散在水中,不易聚沉。3 种类型表面活性剂沉降行为实验结果与 2.2 节中分散行为实验结果相一致。

2.4 势能曲线模拟

纳米颗粒在水中的稳定性与颗粒间作用力有

关,颗粒间作用力可以用引力势能和斥力势能来表示。当颗粒间的斥力势能大于引力势能时,颗粒相互排斥而分散于水中,纳米颗粒间的引力势能 V_A 和斥力势能 V_R 可以运用 DLVO 理论得出^[29~32]:

$$V_A = -\frac{Ar}{12h} = -\frac{Ad}{24h} \quad (1)$$

$$V_R = 2\pi\epsilon\epsilon_0\zeta^2\ln[1 + \exp(-\kappa h)] \\ = \pi\epsilon\epsilon_0d\zeta^2\ln[1 + \exp(-\kappa h)] \quad (2)$$

$$V = V_A + V_R \quad (3)$$

式中, V_A 为引力势能, V_R 为斥力势能, V 为总势能, A 为 Hamaker 常数, r 为颗粒的平均半径, d 为 nTiO₂ 的平均粒径, h 为颗粒间的距离, ϵ 和 ϵ_0 分别为相对介电常数和真空介电常数; ζ 为 nTiO₂ 的 Zeta 电位; κ 是双电层的一个参数, κ^{-1} 称为 Debye 长度。

选择浓度、pH 值、电解质浓度以及添加不同种类表面活性剂的 nTiO₂ 悬浊液,根据实验测得的 Zeta 电位、平均粒径值及其他相关参数,利用 DLVO 理论计算不同条件下颗粒间的引力势能和斥力势能,结果见表 1。

根据表 1 中的计算结果绘制相应的总势能曲线 ($V = V_A + V_R$),结果如图 7 所示。图 7(a) 是浓度分别为 5、20 和 40 mg·L⁻¹ 的 nTiO₂ 悬浊液中 nTiO₂ 颗

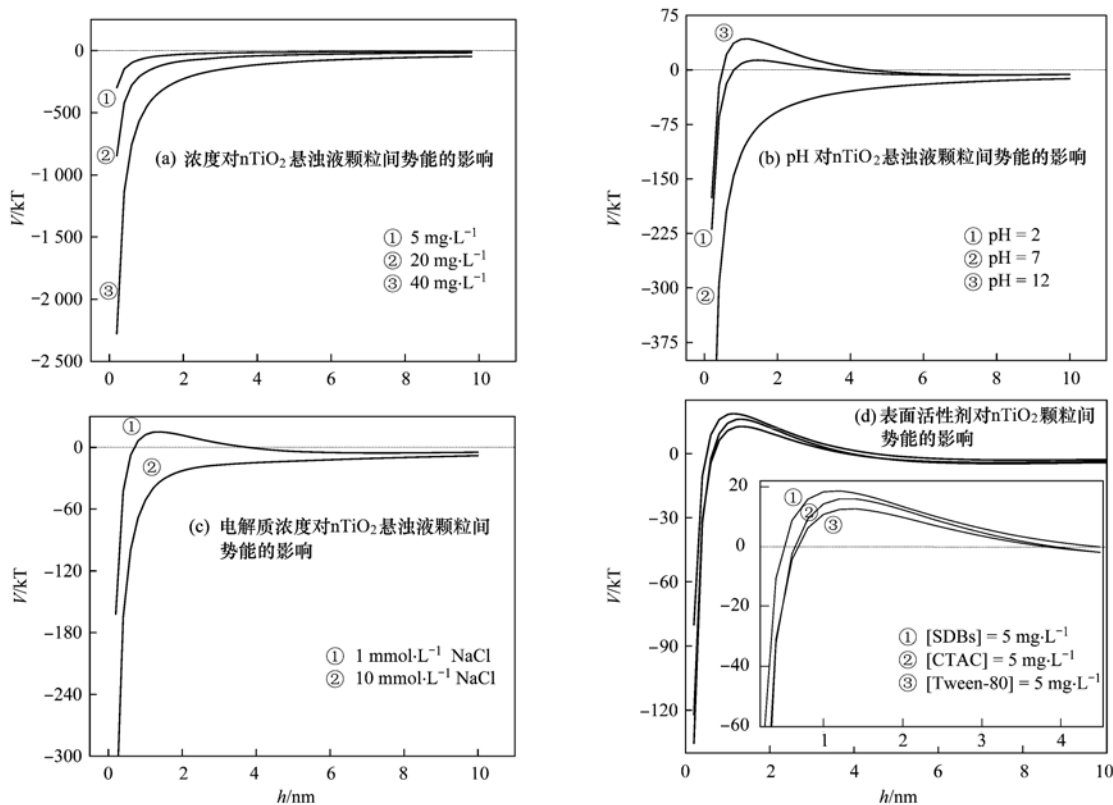


图 7 不同条件下 nTiO₂ 悬浊液颗粒间势能变化曲线

Fig. 7 Potential energy of nTiO₂ particles in suspensions

表 1 nTiO₂ 悬浊液 Zeta 电位、平均粒径及势能表达式¹⁾

Table 1 Zeta potential, d-average and potential energy expression of nTiO ₂ suspensions					
项目	数据选取	Zeta 电位/mV	平均粒径/nm	引力势能 V _A	斥力势能 V _R
nTiO ₂ 浓度 /mg·L ⁻¹	5	-8.43	238.6	$V_A = -\frac{60.33}{h}kT$	$V_R = 8.97 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	20	-7.03	676.0	$V_A = -\frac{170.94}{h}kT$	$V_R = 17.67 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	40	-4.43	1 808.9	$V_A = -\frac{457.35}{h}kT$	$V_R = 18.77 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
pH	2	-67.51	267.03	$V_A = -\frac{67.51}{h}kT$	$V_R = 255.88 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	7	-5.83	473	$V_A = -\frac{119.59}{h}kT$	$V_R = 8.50 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	12	-35.5	259.2	$V_A = -\frac{65.66}{h}kT$	$V_R = 172.63 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
NaCl 浓度 /mmol·L ⁻¹	1	-37.2	202.35	$V_A = -\frac{51.16}{h}kT$	$V_R = 148.07 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	10	-20.7	328.9	$V_A = -\frac{83.16}{h}kT$	$V_R = 74.52 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
表面活性剂种类 (5 mg·L ⁻¹)	SDBs	-42.27	120	$V_A = -\frac{30.34}{h}kT$	$V_R = 113.37 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	CTAC	38.37	175.5	$V_A = -\frac{44.37}{h}kT$	$V_R = 136.62 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$
	Tween80	-37.7	154.7	$V_A = -\frac{39.11}{h}kT$	$V_R = 116.26 \ln[1 + \exp(-\kappa h)]kT$

1) 查阅文献[33], 纳米 TiO₂ 在水中的 Hamaker 常数(通常以 A₁₃₁ 表示)取值为 2.5 × 10⁻²⁰ J, 本试验中选取 A 的值即为 2.5 × 10⁻²⁰ J; 水的相对介电常数为 78.36, 真空介电常数取值 8.854 × 10⁻¹² F·m⁻¹; 除考虑电解质对 nTiO₂ 分散的影响, κ⁻¹ 均取值 1.6 nm, NaCl 浓度为 1 mmol·L⁻¹ 和 10 mmol·L⁻¹ 时, κ⁻¹ 分别取 3.04 nm 和 0.96 nm^[34]; 势能表达式均用含有 kT 的表达式来表示, 其中 1 kT = 4.12 × 10⁻²¹ J

粒间的总势能曲线. 从中可知, 随浓度增加, nTiO₂ 间的势能逐渐增大, 且均表现为引力, 即随着浓度增加, 颗粒间引力作用增强, 促使 nTiO₂ 颗粒相互吸引并碰撞发生聚沉, 验证了图 2 中随着 nTiO₂ 浓度增加, 悬浊液的吸光度和平均粒径均增加的结论. 图 7(b) 为不同 pH 值条件下 nTiO₂ 颗粒间的总势能曲线, 在 pH = 2 和 pH = 12 时, nTiO₂ 颗粒相互靠近需越过势能极值才能发生相互碰撞、聚集、沉降. 说明溶液 pH 值偏离 nTiO₂ 在水中的等电点越远, 势能极值越大, nTiO₂ 相互靠近需要的能量越高, nTiO₂ 在水中越稳定, 越不易发生团聚而沉降. 图 7(c) 是不同浓度电解质(NaCl)对 nTiO₂ 颗粒间势能的影响, 在较低的离子浓度下, 颗粒间的静电斥能较高, 系统较稳定. 随浓度增加, 颗粒间的静电斥力作用受到屏蔽, 能垒下降, 系统趋于不稳定. 从图 7(d) 可以看出, 无论添加何种表面活性剂, 总势能曲线总显示为斥力作用, 这主要是由于表面活性剂的添加, nTiO₂ 颗粒间的能垒增加, 颗粒能够稳定分散在水中. 从图 7 分析可知, 势能曲线拟合与实验测定结果相符.

3 结论

(1) P25 nTiO₂ 的等电点约为 6.7, pH 值越偏离

nTiO₂ 的等电点, 颗粒间静电斥力作用越强, 越不易发生聚沉.

(2) 电解质电离后在 nTiO₂ 表面发生选择性吸附, 改变了 nTiO₂ 颗粒表面电位, 从而影响 nTiO₂ 在水中的稳定性.

(3) 表面活性剂能在一定程度上改善 nTiO₂ 的分散稳定性, 防止 nTiO₂ 发生聚沉. 低浓度 SDBS 和 Tween-80 能提高 nTiO₂ 的稳定性, 颗粒稳定分散于水中; 低浓度的 CTAC 中和了 nTiO₂ 颗粒表面所带负电荷, 导致颗粒失稳, 发生聚沉. 表面活性剂浓度过高时, 会在 nTiO₂ 表面发生多层吸附, 表面活性剂的憎水链相互连接, 导致 nTiO₂ 团聚而沉降.

(4) 由 DLVO 理论拟合势能曲线可知, 水环境因素主要通过改变颗粒间作用力影响 nTiO₂ 的分散稳定性.

参考文献:

[1] Petosa A R, Jaisi D P, Quevedo I R, *et al.* Aggregation and deposition of engineered nanomaterials in aquatic environments: role of physicochemical interactions[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(17): 6532-6549.
[2] Wiesner M, Bottero J Y. Environmental Nanotechnology, Application and Impacts of Nanomaterials[M]. New York: McGraw-Hill, 2007.

- [3] 李青松, 高乃云, 马晓雁, 等. TiO_2 光催化降解水中内分泌干扰物 17 β -雌二醇[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 120-125.
- [4] 丁震, 冯小刚, 陈晓东, 等. 金属泡沫镍负载纳米 TiO_2 光催化降解甲醛和 VOCs[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1814-1819.
- [5] Lowry G V, Hotze E M, Bernhardt E S, *et al.* Environmental occurrences, behavior, fate, and ecological effects of nanomaterials an introduction to the special series[J]. Journal of Environment Quality, 2010, **39**(6): 1867-1874.
- [6] Klaine S J, Alvarez P J, Batley G E, *et al.* Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(9): 1825-1851.
- [7] 王震宇, 赵建, 李娜, 等. 人工纳米颗粒对水生生物的毒性效应及其机制研究进展[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1409-1418.
- [8] 熊道文, 方涛, 陈旭东, 等. 纳米材料对斑马鱼的氧化损伤及应激效应研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1320-1327.
- [9] Chen J Y, Dong X, Xin Y Y, *et al.* Effects of titanium dioxide nano-particles on growth and some histological parameters of zebrafish (*Danio rerio*) after a long-term exposure[J]. Aquatic Toxicology, 2011, **101**(3-4): 493-499.
- [10] Wang J J, Zhu X S, Zhang X Z, *et al.* Disruption of zebrafish (*Danio rerio*) reproduction upon chronic exposure to TiO_2 nanoparticles[J]. Chemosphere, 2011, **83**(4): 461-467.
- [11] 王震宇, 于晓莉, 高冬梅, 等. 人工合成纳米 TiO_2 和 MWCNTs 对玉米生长及其抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 480-487.
- [12] 汤鸿霄. 环境纳米污染物与微界面水质过程[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(2): 146-155.
- [13] Choy C C, Wazne M, Meng X Q. Application of an empirical transport model to simulate retention of nanocrystalline titanium dioxide in sand columns [J]. Chemosphere, 2008, **71**(9): 1794-1801.
- [14] 张桂玲, 戴柏青. 嘌呤受羟基自由基损伤机制的量子化学研究[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2000, **16**(1): 120-123.
- [15] 张学治. 纳米二氧化钛在水环境中的行为研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [16] 吴其圣, 杨琛, 胡秀敏, 等. 环境因素对纳米二氧化钛颗粒在水中沉降性能的影响[J]. 环境科学学报, **32**(7): 1596-1603.
- [17] Li K G, Zhang W, Huang Y, *et al.* Aggregation kinetics of CeO_2 nanoparticles in KCl and CaCl_2 solutions: measurements and modeling[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2011, **13**(12): 6483-6491.
- [18] Solovitch N, Labille J, Rose J, *et al.* Concurrent aggregation and deposition of TiO_2 nanoparticles in a sandy porous media[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(13): 4897-4902.
- [19] Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles [J]. Environmental Health Prospective, 2005, **113**(7): 823-839.
- [20] Ge Y, Schimel J P, Holden P A. Evidence for negative effects of TiO_2 and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(4): 1659-1664.
- [21] Godinez I G, Darnault C J G. Aggregation and transport of nano- TiO_2 in saturated porous media: Effects of pH, surfactants and flow velocity[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 839-851.
- [22] Zhang Y, Chen Y S, Westerhoff P, *et al.* Impact of natural organic matter and divalent cations on the stability of aqueous nanoparticles[J]. Water Research, 2009, **43**(17): 4249-4257.
- [23] Zhu X S, Zhou J, Cai Z H. TiO_2 Nanoparticles in the marine environment: Impact on the toxicity of tributyltin to abalone (*halotis diversicolor supertexta*) embryos [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(8): 3753-3758.
- [24] Grassian V H, Adamcakova-Dodd A, Pettibone J M, *et al.* Inflammatory response of mice to manufactured titanium dioxide nanoparticles: Comparison of size effects through different exposure routes[J]. Nanotoxicology, 2007, **1**(3): 211-226.
- [25] Tseng Y H, Lin H K, Kuo C S, *et al.* Thermostability of nano- TiO_2 and its photocatalytic activity [J]. Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 2006, **89**(1): 63-69.
- [26] Areepitak T, Ren J H. Model simulations of particle aggregation effect on colloid exchange between streams and streambeds[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(13): 5614-5621.
- [27] 周艺, 何小川, 王炎根. Tween80 和 SDBS 对纳米 TiO_2 在水溶液中分散稳定性的影响[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, **17**(4): 72-75.
- [28] 全建峰, 陈大明, 陈宇航, 等. 纳米陶瓷复合材料制备工艺中 nano-SiC 与基体 Al_2O_3 粉末的均匀分散[J]. 硅酸盐通报, 2000, **17**(3): 24-27.
- [29] Croll S. DLVO theory applied to TiO_2 pigments and other materials in latex paints [J]. Progress in Organic Coatings, 2002, **44**(2): 131-146.
- [30] 李玲. 表面活性剂与纳米技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 155-159.
- [31] 高濂, 孙静, 刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 59-62.
- [32] Liu X R, Qiu G Z, Hu Y H, *et al.* Application of extended DLVO theory in emulsion stability research [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, **14**(3): 582-586.
- [33] 卢寿慈. 工业悬浮液: 性能, 调制及加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 59.
- [34] Heimenz P C. Principles of colloid and surface chemistry[M]. (2nd ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 1986.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行