

不同 pH 条件下赤铁矿纳米粒子的聚集和再分散行为研究

沈欣, 李开阳, 李喜青*

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 纳米粒子的聚集和再分散行为是影响纳米粒子在环境中归趋的重要因素。选取赤铁矿纳米粒子作为研究对象, 用 Zeta 电位和粒径测定仪系统研究其在不同 pH 条件下的聚集和再分散过程。结果表明, 当 pH 在 7.0~8.7 之间时, 赤铁矿纳米粒子发生较快的聚集(如当 pH 为 8.2 时平均粒径在 400 s 内由 31 nm 增加到 1 400 nm)。当 pH ≤ 6.3 时, 赤铁矿纳米粒子几乎不发生聚集。不经老化聚集的赤铁矿纳米粒子均能发生再分散, 但是再分散过程并不完全可逆, 而是呈现一定的非线性。老化使得更多的赤铁矿纳米粒子发生不可逆的聚集, 在等电点处老化后的样品不发生再分散。当 pH 为 7.0 和 8.9 时, 老化的样品再分散后的平均粒径(约 500 nm)大于不老化的样品(约 250 nm)。纳米粒子聚集-再分散过程的非线性对预测其在环境中的存在状态和生态效应带来了大的困难。

关键词: 赤铁矿; 纳米粒子; 聚集; 再分散; 老化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2439-06

Aggregation and Deaggregation Behaviors of Hematite Nanoparticles at Different pHs

SHEN Xin, LI Kai-yang, LI Xi-qing

(Laboratory of Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The aggregation and deaggregation behaviors have profound impacts on the fate of nanoparticles in the environment. In this work, the aggregation and deaggregation kinetics of hematite nanoparticles at different pHs were examined using a Zetasizer. In the pH range of 7.0-8.7, aggregation occurred quickly (e.g., the average size increased from 31 nm to 1 400 nm with 400 s at pH = 8.2), whereas at pH below 6.2, no aggregation was observed. Deaggregation of hematite nanoparticles without aging was slower than aggregation and not completely reversible, demonstrating hysteresis. Aging caused more hematite nanoparticles to aggregate irreversibly. At point of zero charge (pH = 8.2), no deaggregation of aged particles was observed. At pH = 7.0 and 8.9, the average sizes of aged samples (about 500 nm) after deaggregation was greater than those of the samples without aging (about 250 nm). The hysteresis of the aggregation-deaggregation process poses significant difficulty to predict the fate and ecological effects of nanoparticles in the environment.

Key words: hematite; nanoparticles; aggregation; deaggregation; aging

纳米粒子是指至少有一维的尺寸 < 100 nm 的超细颗粒。由纳米粒子组成的纳米材料表现出许多块材所不具备的新颖的物理和化学性能, 使得它在能源、涂料、化妆品、医药、纺织和电子等领域具有广泛的应用前景。目前世界已至少有 500 种纳米产品^[1], 预计到 2012 年纳米材料的产值将达 1 万亿美元^[2]。纳米材料的大规模应用无疑会使大量纳米粒子通过多种途径(如空气排放、意外泄漏等)进入环境。尽管到目前为止还没有纳米材料导致人体健康和环境问题的报道, 但已有研究表明部分纳米颗粒可以对人体和环境产生负面影响^[3], 如富勒烯(即 C₆₀)可以在大口黑鲈(largemouth bass)的脑部产生氧化应激^[4], 铜纳米粒子可以对小鼠的肾、肝和脾产生严重损害^[5]。正是因为纳米技术预期的大

量应用和纳米材料潜在的环境影响, 如何评价纳米材料的安全性并加以正确的管理已成为一项刻不容缓的任务。纳米材料的安全性评价和正确管理不仅取决于纳米粒子毒性(对人体、动物和植物)数据的获取, 还必须以对纳米粒子进入环境后归趋的准确把握为基础。

纳米粒子本身的稳定性, 即纳米粒子的聚集(aggregation)和再分散(disaggregation)行为是影响纳米粒子在环境中归趋的重要因素。溶液的化学条件(如溶液的离子强度、离子的类型、pH 值)对纳米

收稿日期: 2009-12-24; 修订日期: 2010-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772147)

作者简介: 沈欣(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为胶体和纳米粒子在环境中的迁移行为, E-mail: janeshenxin@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xli@urban.pku.edu.cn

粒子的稳定性具有决定性的影响,这是因为这些条件参数决定了纳米粒子双电层的厚度,从而直接影响纳米粒子的聚集和再分散. 纳米粒子进入环境后很可能经历不同的水化学条件,也就是说纳米粒子会经历反复的聚集和再分散过程,因此准确理解这一过程对于预测纳米粒子的归趋具有重要意义. 本实验选取赤铁矿纳米粒子作为对象,系统研究其在不同 pH 条件下的聚集和再分散过程. 之所以选择赤铁矿纳米粒子是因为铁氧化物纳米粒子可以通过吸附、氧化还原反应和生化反应等过程影响微量金属及其他污染物在环境中的归趋和生物有效性^[6~8]. 目前文献中已有不少关于赤铁矿纳米粒子聚集行为的研究报道^[9~12],如 He 等^[13]研究了赤铁矿纳米粒子粒径对于聚集动力学的影响, Ji 等^[14]研究了表面活性剂对赤铁矿纳米粒子聚集的影响. 关于赤铁矿纳米粒子聚集后的再分散行为的研究相对较少, Gilbert 等^[15]研究了 FeCl_3 水解生成氧化铁胶体的中间产物 FeOOH 的聚集与分散特征,发现当溶液的 pH 超过 7 时胶体粒径达到 1 000 nm 以上,此时将胶体体系的 pH 调到 4,在没有摇晃的情况下,胶体又可以回到肉眼认为是澄清透明的状态. Baalousha 等^[16,17]研究了 pH 值、浓度、有机质对氧化铁纳米粒子稳定性的影响,发现有机质浓度达到一定值时可以使聚集的氧化铁纳米粒子重新分散. 影响纳米粒子稳定性另一重要因素是老化,即纳米粒子聚集的时间更长一些. 现有的关于赤铁矿纳米粒子老化的研究主要集中在老化对其进一步聚集的影响^[18~20]. 因此本研究将特别地考察老化对赤铁矿纳米粒子聚集后再分散的影响.

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

六水三氯化铁(国美集团化学试剂有限公司)、氢氧化钠(北京化工厂)、盐酸(北京化工厂)均为国产分析纯;pH 计(Delta 320, Mettler Toledo);透析膜(型号 MD34, MWCO: 8 000 ~ 14 000, 北京索莱宝科技有限公司);超声波清洗器(KQ-5200B 型, 昆山市超声仪器有限公司);粒度和 Zeta 电位测定仪(NANO ZS90 Zetasizer, Malvern Inc.);超纯水由 Milli-Q 纯水仪(Millipore Inc., Billerica, MA)制得.

1.2 赤铁矿纳米粒子的制备和纯化

本研究采样与 He 等^[14]相似的方法制备赤铁矿纳米粒子. 具体方法是:配制 50 mL 0.5 mol/L 的 FeCl_3 水溶液,以滴管滴入到 950 mL 煮沸的超纯水

中,加完后继续煮沸 5 min,之后冷却到室温. 通过透析对制备的纳米粒子进行纯化:将样品装入处理好的透析膜中,并放入装有 4 000 mL 超纯水的 5 000 mL 烧杯中,每天换 2 次水,共透析 4 d. 刚开始透析时烧杯中水变成浅黄色(三价铁离子的颜色),透析结束后肉眼已不能在烧杯的水中看到明显的颜色,经原子吸收光谱仪测定显示铁离子的浓度为 1 mg/L 左右. 透析后赤铁矿纳米粒子溶胶的 pH 值为 4.0,经 Zetasizer 测定,透析后纳米粒子的平均粒径为 (31.0 ± 1.0) nm.

1.3 赤铁矿纳米粒子 Zeta 电位的测定

配制 pH = 1.08 的 HCl 溶液和 pH = 12.88 的 NaOH 溶液,用于调节透析后赤铁矿纳米粒子溶胶的 pH 值. 在此浓度下将 10 mL 样品 pH 值调至所希望的值时,加入的 HCl 溶液或 NaOH 溶液的体积最多为 40 μL ,因此对纳米粒子的浓度没有明显的影响. 首先按预实验的结果,迅速将相应量的 NaOH 溶液加入 10 mL 胶体样品中并快速摇匀,得到 pH 值分别为 5.3、6.2、7.0、8.2 和 8.9 的纳米粒子体系. 摇匀后用移液枪移取出样品,用温度已调整为 20℃ 的 Zetasizer 测定各 pH 值下纳米粒子的 Zeta 电位.

1.4 赤铁矿纳米粒子的聚集实验

用同样的方法得到 pH 值分别为 5.3、6.2、7.0、8.2、8.7 和 8.9 的纳米粒子体系. 摇匀后用移液枪取出 1 mL 样品,用温度已调整为 20℃ 的 Zetasizer 测定粒径随时间的变化. 从摇匀样品到获得第一个粒径数据的时间间隔一般不超过 45 s. 在测量的初始阶段,测量的时间间隔为 4 ~ 5 s,连续测量 25 min. 在部分 pH 值下(见结果部分)继续测量 35 min(总时间为 1 h),测量的时间间隔增加到 9 ~ 10 s.

1.5 赤铁矿纳米粒子的再分散实验

在一个特定 pH 值下的聚集实验结束后,考虑已加入的 NaOH 溶液的量及每个样品均损失了 1 mL (用于测定聚集过程中粒径的变化),迅速将相应量的 HCl 溶液加入溶胶样品中(用于中和 NaOH)并摇匀,使溶液的 pH 值回复到初初值(4.0),并迅速用加样枪取出 1 mL,以测量温度调整为 20℃ 的 Zetasizer 测定粒径随时间的变化.

为研究老化对再分散的影响,用同样的方法分别制备 pH 为 5.3、6.2、7.0、8.2 和 8.9 的溶胶,并在室温下放置 30 d. 此时,部分样品会出现聚集和沉降. 老化结束后,用 HCl 溶液将溶胶的 pH 值调至初始值. 迅速移取 1 mL,再用 Zetasizer 测定粒径随时间的变化.

2 结果与讨论

2.1 赤铁矿纳米粒子的 Zeta 电位

赤铁矿纳米粒子在酸性条件下带正电荷 (Zeta 电位为正值), 随着 pH 值的增加, Zeta 电位不断下降 (图 1), 在 $\text{pH} = 8.2$, Zeta 电位近似等于 0, 亦即 $\text{pH} = 8.2$ 为赤铁矿纳米粒子的等电点. 这一值和报道的值非常接近^[14,16]. 当 pH 值继续升高时, 赤铁矿纳米粒子表面带负电荷 (Zeta 电位为负值).

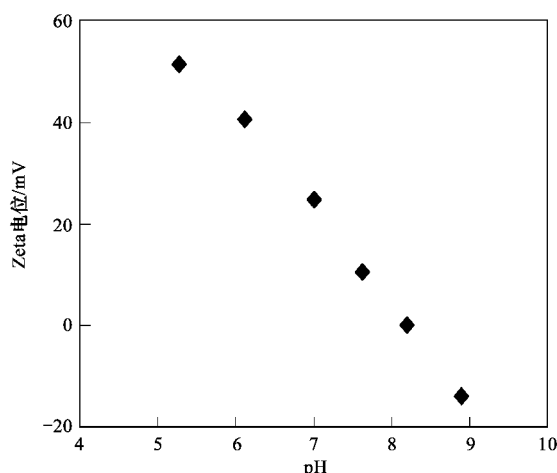


图 1 赤铁矿纳米粒子在不同 pH 下的 Zeta 电位

Fig. 1 Zeta potentials of hematite nanoparticles at different pHs

2.2 赤铁矿纳米粒子的聚集

由于把溶胶 pH 值调至预定值和测得第一个粒径数据之间相隔 40 s 左右, 即赤铁矿纳米粒子在测定之前经历了一个短暂的聚集过程, 因此在各个 pH 值下测得的粒径都大于初始平均粒径 (31 nm) (图 2). 在聚集实验的最初 400 s, 当 pH 为 7.0、8.2、8.7 时, 赤铁矿纳米粒子的平均粒径随时间呈线性增加, 其中在等电点 ($\text{pH} = 8.2$) 时, 粒径增大的速率最大, 在 $\text{pH} = 7.0$ 时次之, 在 $\text{pH} = 8.7$ 时最小 (图 2). 当 pH 为 5.3、6.2、8.9 时, 赤铁矿纳米粒子的平均粒径不随时间而发生显著变化 (图 2), 其中当 $\text{pH} = 5.3$ 时, 赤铁矿纳米粒子的平均粒径一直保持在 50 nm 左右; 当 $\text{pH} = 6.2$ 时平均粒径一直保持在 115 nm 左右; 当 $\text{pH} = 8.9$ 时平均粒径从起始的 63 nm 增加到 90 nm 左右.

赤铁矿纳米粒子在不同 pH 值条件下聚集行为的差异可以用胶体稳定性理论 (即 Derjagun-Landau-Veewey-Overbeek 理论) 加以定性解释. 在等电点时, 赤铁矿纳米粒子表面不带电荷, 粒子间不存在相斥的静电作用力, 只存在相吸的范德华作用力, 因此粒

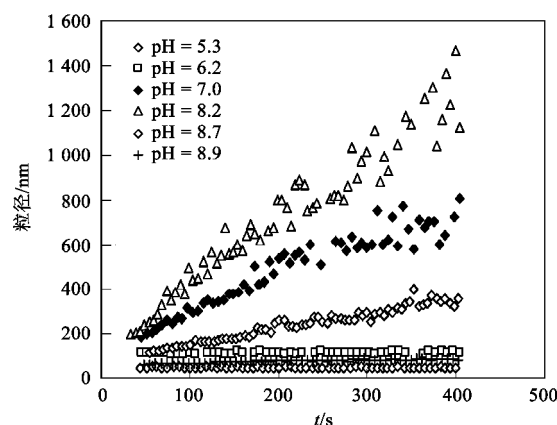


图 2 不同 pH 下赤铁矿纳米粒子平均粒径随时间 (前 400 s) 的变化

Fig. 2 Aggregation of hematite nanoparticles at different pHs in the first 400 s

子间的聚集不存在任何障碍, 聚集的速率最快. 当 pH 值大于或小于等电点时 (pH 为 7.0、8.7、8.9), 赤铁矿纳米粒子表面不带电荷, 粒子间存在一定相斥的静电作用力, 因此聚集的速率下降. 当 pH 值远大于或小于等电点时 (pH 为 5.3、6.2), 粒子间存在很强的静电斥力, 使得总的相互作用表现为相斥, 这时赤铁矿纳米粒子不发生进一步的聚集.

当 $\text{pH} = 8.2$ 时, 随着聚集时间的延长, 平均粒径进一步增大. 经过 1 200 s 的聚集后, 溶胶已经出现沉降现象, 此时溶液不具有均一性, 测定的结果呈现很大的波动 (图 3). 另外, 实验发现摇晃会加快胶体的聚集行为, 因此, 此时等电点处的粒径已无法测定. 在 pH 值接近等电点的条件下 (pH 为 7.0、8.7), 在前 2 400 s 没有发生明显沉降, 在此之后, 由

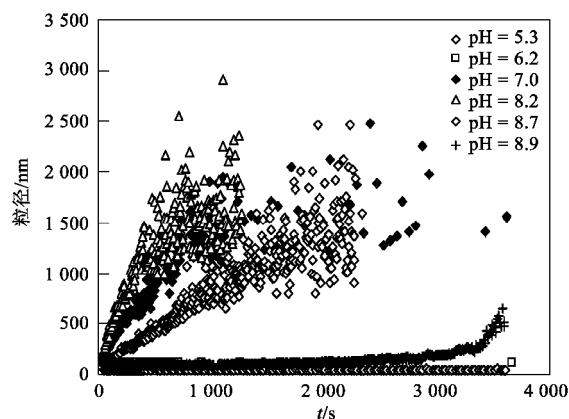


图 3 不同 pH 下赤铁矿纳米粒子平均粒径随时间的变化

Fig. 3 Aggregation of hematite nanoparticles at different pHs

于同样的原因,测定的结果呈现很大的波动;而对于其它的样品,在进行聚集行为至稳定时,都没有观察到明显的沉降行为. 在 $\text{pH} = 8.9$ 时,在最初 3 400 s 的时间里,聚集非常缓慢,而过了 3 400 s,出现了聚集速度较快增加的现象. 目前还无法对此作出解释.

2.3 赤铁矿纳米粒子的重新分散

在再分散实验的前 2 400 s, pH 为 7.0、8.2、8.9 的溶胶中赤铁矿纳米粒子粒径发生显著的下降,4 500 s 后平均粒径的变化已经很小(图 4). 如 $\text{pH} = 7.0$ 时,平均粒径从最初的 675 nm 下降到 4 500 s 的 271 nm (下降了 404 nm), 而到 8 000 s 时,平均粒径为 253 nm (下降了 18 nm). 放置 22 h 后,平均粒径降至 164 nm, 进一步放置至 25 h,平均粒径为 157 nm (图 4 中未显示),说明平均粒径几乎不再发生变化,也就是说不再发生进一步的再分散. 当 pH 为 7.2、8.9 时也观察到了类似的现象. 这些观察说明赤铁矿纳米粒子聚集有一定的可逆性(即可以发生再分散),但是再分散的速率远低于聚集的速率,再分散后的平均粒径大于最初的平均粒径(31.0 nm),即其聚集-再分散过程并不是一个完全可逆的过程,而是具有一定的非线性(hysteresis). 当 pH 为 5.3、6.2 时,赤铁矿纳米粒子的平均粒径在观察期间并未发生明显的变化,并且同样没有回复到原来的值($31.0 \text{ nm} \pm 1.0 \text{ nm}$).

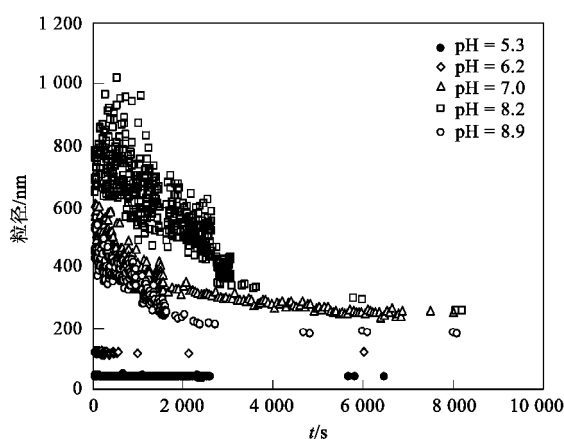


图 4 不同 pH 下聚集的赤铁矿纳米
未经老化的再分散行为

Fig. 4 Deaggregation of hematite nanoparticles without aging

当 pH 为 5.3、6.2 时,老化 30 d 后赤铁矿纳米粒子的平均粒径分别为(50.0 ± 2.0) nm 和 (115.0 ± 5.0) nm, 说明在这 2 个 pH 条件下,老化过程并没有促进赤铁矿纳米粒子的进一步聚集,把 pH 调

回最初值(4.0)后,平均粒径也没有明显的变化. 在其余 3 个 pH 条件下,30 d 后平均粒径均超出了仪器的测量范围($6 \mu\text{m}$),特别是在等电点处,老化后出现了明显的沉淀. 将 pH 调回最初值时,原来 $\text{pH} = 8.2$ 的样品中的沉淀并未消失,说明经老化后赤铁矿纳米粒子发生了不可逆的聚集. pH 为 7.0 和 8.9 的样品中的平均粒径出现了显著的下降(图 5),说明在这 2 个 pH 条件下老化过程中发生的聚集并不是完全不可逆的. 但是,经 3 h 再分散后基本稳定的平均粒径(约 500 nm)要显著大于未经老化后的样品经同样长时间再分散后的平均粒径(约 250 nm)(图 4、5).

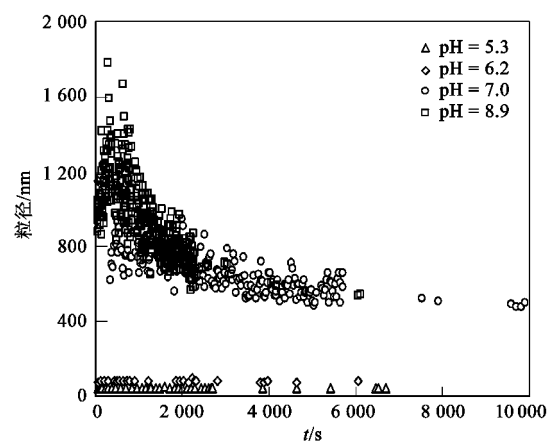


图 5 不同 pH 下聚集的赤铁矿纳米
老化后的再分散行为

Fig. 5 Deaggregation of hematite nanoparticles after aging

等电点附近(pH 为 7.0~8.9)的赤铁矿纳米粒子聚集的不完全可逆性可以用 DLVO 理论加以定性说明. 在这些 pH 条件下,赤铁矿纳米粒子 — 上带相同的表面电荷,因此随着纳米粒子间距离(separation distance)的增大,赤铁矿纳米粒子的相互作用依次表现为强烈的相吸(即存在初级势阱, primary energy minimum)、相斥(即存在势垒, energy barrier)和很弱的相吸(即次级势阱, secondary minimum). pH 值越接近等电点,势垒的高度越小(越容易克服),次级势阱越深. 一般来说当纳米粒子能克服势垒通过初级势阱聚集时,纳米粒子很难再分散(即聚集是不可逆的). 当纳米粒子不能克服势垒,即只能通过次级势阱聚集时,只要纳米粒子布朗运动的动能(其平均值为 1.5 kT)大于次级势阱,纳米粒子有可能再分散. 赤铁矿纳米粒子聚集的不完全可逆性可能是因为部分赤铁矿纳米粒子表面的电荷存在不均一性,它们之间的相互作用不存在势

垒和或者势垒很低,也即这部分赤铁矿纳米粒子能通过初级势阱聚集.而在老化过程中,布朗运动可以使更多的赤铁矿纳米粒子克服势垒,形成不可逆的聚集,其表现就是老化后再分散的平均粒径大于未老化再分散的平均粒径.

2.4 赤铁矿纳米粒子再分散行为的启示

纳米粒子的聚集和再分散决定了其在环境中以何种粒径存在,而粒径对其环境行为有极为重要的影响.首先,粒径决定了其在水中的沉降速率,因为沉降速率与粒径的三次方呈正比.因此,可以想象当纳米粒子进入水体并聚集形成较大的粒子时会发生迅速的沉降,从而很快进入沉积物,不会被迁移到很远的地方.其次,当纳米粒子进入土壤时粒径决定了它的吸附行为.当粒子和土壤颗粒的相互作用大致相同时,在 $10\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,粒径越大,粒子越不容易吸附,也就是说大的粒子会迁移更远的距离^[21].另外粒径还决定了纳米粒子的生态效应,粒径很小的粒子可以穿透细胞壁,而大的粒子不能^[22].纳米粒子进入环境后可能经历不同的溶液化学条件,也就是说会反复经历聚集和再分散过程.本研究显示赤铁矿纳米粒子的聚集-再分散并不完全可逆的,而是具有的一定的非线性,并且老化会进一步增加这种非线性.这说明纳米粒子存在的形态不仅跟它当前所处的溶液化学条件有关,而且和它之前经历的化学环境有很大的关系.因此很难根据它当前所处的溶液化学条件预测其存在的状态.显然,这给准确预测纳米粒子的环境和生态效应带有很大的困难.

3 结论

(1) 赤铁矿纳米粒子的等电点为 $\text{pH} = 8.2$. 当 pH 在 $7.0 \sim 8.9$ 时,赤铁矿纳米粒子发生较快的聚集.当 $\text{pH} < 7.0$ 时,赤铁矿纳米粒子几乎不发生聚集.

(2) 不经老化后聚集的赤铁矿纳米粒子均能发生再分散.再分散并不完全可逆,呈现一定的非线性.

(3) 老化使得更多的赤铁矿纳米粒子发生不可逆的聚集,在等电点处老化后的样品不发生再分散.当 pH 为 7.0 、 8.9 时,老化的样品再分散后的平均粒径大于不老化的样品.

(4) 纳米粒子聚集-再分散过程的非线性使得其在环境中的存在状态和生态效应难以预测.

参考文献:

- [1] Chatterjee R. The challenge of regulating nanomaterials [J]. Environ Sci Technol, 2008, **42** (2): 339-343.

- [2] Service R. Nanotechnology grows up [J]. Science, 2004, **304**: 1732-1734.
- [3] Chen Z, Meng H A, Xing G M, *et al.* Acute toxicological effects of copper nanoparticles in vivo [J]. Toxicol Lett, 2006, **163** (2): 109-120.
- [4] Nel A, Xia T, Madler L, *et al.* Toxic potentials of materials at the nanoscale [J]. Science, 2006, **311**: 622-627.
- [5] Oberdorster E. Manufactured nanomaterials (Fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth Bass [J]. Environ Health Perspect, 2004, **112**: 1058-1062.
- [6] Heidmann I, Christl I, Kretzschmar R. Aggregation kinetics of kaolinite-fulvic acid colloids as affected by the sorption of Cu and Pb [J]. Environ Sci Technol, 2005, **39**: 807-813.
- [7] Hochella M F, Moore J N, Putnis C V, *et al.* Direct observation of heavy metal-mineral association from the Clark Fork River Superfund Complex: implications for metal transport and bioavailability [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2005, **69**: 1651-1663.
- [8] Kimball B A, Callender E, Axtmann E V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River [J]. Colorado: USA Appl Geochem, 1995, **10**: 285-306.
- [9] Plaza R C, Quirantes A, Delgado A V. Stability of dispersions of colloidal hematite/yttrium oxide core-shell particles [J]. J Colloid Interface Sci, 2002, **252**: 102-108.
- [10] Chen K L, Mylon S E, Elimelech M. Aggregation kinetics of alginate-coated hematite nanoparticles in monovalent and divalent electrolytes [J]. Environ Sci Technol, 2006, **40**: 1516-1523.
- [11] Amal R, Coury J R, Raper J A, *et al.* Structure and kinetics of aggregating colloidal hematite [J]. Colloids Surf, 1990, **46**: 1-19.
- [12] Lichtenfeld H, Knapschinsky L, Sonntag H, *et al.* Fast coagulation of nearly spherical ferric oxide (haematite) Particles [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp, 1995, **104**: 313-320.
- [13] He Y, Wan J, Tokunaga T. Kinetic stability of hematite nanoparticles: the effect of particle sizes [J]. J Nanopart Res, 2008, doi: 10.1007/s11051-007-9255-1.
- [14] Ji Y, Black L, Köster R, *et al.* Hydrophobic coagulation and aggregation of hematite particles with sodium dodecylsulfate [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp, 2007, **298**: 235-244.
- [15] Gilbert B, Lu G, Kim C S. Stable cluster formation in aqueous suspensions of iron oxyhydroxide nanoparticles [J]. J Colloid Interface Sci, 2007, **313**: 152-159.
- [16] Baalousha M. Aggregation and disaggregation of iron oxide nanoparticles: Influence of particle concentration, pH and natural organic matter [J]. Sci Total Environ, 2009, **407**: 2093-2101.
- [17] Baalousha M, Manciulea A, Cumberland S, *et al.* Aggregation and surface properties of iron oxide nanoparticles: influence of pH and natural organic matter [J]. Environ Toxicol Chem, 2008, **27**: 1875-1882.
- [18] Tombácz E, Illés E, Majzik A, *et al.* Ageing in the inorganic nanoworld: example of magnetite nanoparticles in aqueous medium [J]. Croatia Chemica Acta, 2007, **80** (3-4): 503-515.

- [19] Penn R L, Oskam G, Strathmann T J, *et al.* Epitaxial assembly in aged colloids[J]. *J Phys Chem B*, 2001, **105**:2177-2182.
- [20] Waychunas G A, Kim C S, Banfield J F. Nanoparticulate iron oxide minerals in soils and sediments: unique properties and contaminant scavenging mechanisms[J]. *J Nanopart Res*, 2005, **7**:409-433.
- [21] Yao K M, Habibian M T, O'Melia C R. Water and waste water filtration: Concepts and applications[J]. *Environ Sci Technol*, 1971, **5** (11): 1105-1112.
- [22] Navarro E, Baun A, Behra R, *et al.* Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi[J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**:372-386.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容※ 研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言※ 国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.对未刊稿件一般不退,请作者自留底稿.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjks@rcees.ac.cn;网址: www.hjks.ac.cn