DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.02.011



# 纳米技术在水处理和废水回收中的应用

杨 建 东

(陇南师范高等专科学校农林技术学院,甘肃 成县 742500)

## 摘 要

本世纪全球面临最大的挑战之一就是确保实用的洁净水质. 随着世界人口的增加,水污染变得更加复杂,难以移除,在许多地区,气候变暖致使水资源缺乏,因此,废水的回收利用就显得尤为重要,甚至成为可饮用水. 然而,现有的水处理系统不能够满足这一要求. 纳米技术的出现可以提供机会来发展新一代的水处理系统. 本文综述了纳米技术和纳米材料在水处理和废水利用方面的研究进展.

**关键词:** 水资源,水供应系统,纳米技术,废水回收利用.

**中图分类号:** X703

水是生命之源. 水资源安全和处理与地球健康、能源产品和经济发展有千丝万缕的关系. 20 世纪以来,在提供公众饮水健康,农业发展等方面,水供应系统和废水处理技术取得了长足进步. 但是从全球的水资源供应来看,依旧面临诸多问题和挑战. 全世界每年有 8. 84 千万人缺乏足够的饮用水,180 万孩子死于腹泻[1],研究表明其主要原因就是由于水资源受到污染. 因此急需在没有水处理系统的发展中国家提供基础的、可负担得起的水处理系统. 同样在发达国家,水供应系统也面临诸多挑战,一方面当前的水处理系统已经不能满足人们对水质标准的严格要求; 另一方面,新污染源的出现,比如: 药品、个人护理品和病毒等. 无论是集中水处理系统和分销处理系统都不能适应对水质更高标准的要求. 过去的水处理设施耗费能源、对水造成损失,并且会造成水的二次污染[2]. 与此同时,世界人口的过度增长也造成全球水资源的缺乏,因此废水的回收利用在缺水地区是一个必然的选择. 但是当前的废水处理系统并不能满足这一要求. 无论是分离的、集中水处理系统还是废水系统都不能解决可持续的城市水供应. 因此需要一种新技术来提供高效、多功能和便捷的水处理过程. 纳米技术是近年来出现的一门高新技术. 这种技术可以提供超越常规的水处理技术. 研究表明,基于个别纳米技术水处理的性能优于通常惯用的普通处理技术. 本文就基于纳米技术在水处理和废水回收过程的应用研究进展做一综述.

收稿日期: 2015-05-26

## 1 纳米技术的应用

纳米技术不仅可以改进、增加当前水处理技术的性能,并且可以发展为一门新的水处理技术(图 1). 在水处理应用方面,纳米材料具有的高比表面积可以用于吸附、高光催化活性和抗菌性,粒子分离的超顺磁性以及其他一些新颖的光电性质能可以提高水处理的质量. 目前纳米技术及纳米材料在水处理和废水回收应用主要表现在以下几方面.

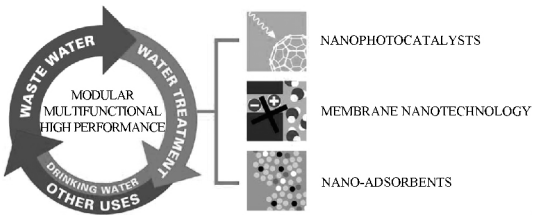



图 1 纳米材料在水处理中的应用

### 1.1 用于吸附剂

纳米吸附剂有许多优于普通吸附剂的性能和好处. 比如: 独特的高表面积,粒子之间作用的距离短,可调控的孔径和表面化学性质. 高比表面积具有高吸附容量. 而且,在纳米尺度上高比表面积能和大小依赖于粒子的表面结构,可以产生高活性的吸附位



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

点[3]. 从而具有较高比表面积的吸附容量.

许多纳米材料可以作为特殊材料的靶向分子,具有高选择性,多孔纳米材料具有可调制的孔径大小和结构来控制吸附动力学. 纳米吸附剂很容易被集成到当前的水处理系统中,例如: 悬浮液反应器、过滤膜和负载多孔颗粒吸附剂.

碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTS)是一种可代替活性炭的纳米材料[4]. 这种纳米管能够有效地去除有机污染物和金属离子. 碳纳米管表面的键合点可以形成污染物与碳纳米管的反应中心,例如,利用碳纳米管表面的憎水性、π-π 作用,氢键、共价键、静电相互作用,来有效控制有机污染物吸附到碳纳米管上. 碳纳米管上的键合点数量比活性炭更加有用,有活性炭材料不具有的孔道. 这种孔道对有机大分子四环素的吸附能力很强. 借助碳纳米管表面富有的 π 电子作为电子给体来吸附缺电子的硝基芳香化合物和酚类化合物,碳纳米管表面修饰的官能团来吸附金属离子,并通过 pH 调节重新循环利用. 然而碳纳米管的高成本限制了它在废水处理的进一步利用. 当前的研究结果表明: 通过抗生素、极性芳烃或样品的预处理都不能很好地除去水中污染物.

氧化石墨片的制备成本低,可以用来作可选择的纳米吸附材料除去金属离子和有机污染物. 另外金属氧化物纳米材料: 例如磁性纳米离子和纳米二氧化钛. 对重金属和放射性核素有很好的吸附作用,是一种可用的起、性能优良的吸附剂. 这些粒子的表面通过修饰操纵可以最大限度来活化吸附点. 例如: 材料角落、边界、空隙和高能量的晶面. 另外,磁性纳米粒子拥有独特的顺磁性,很容易在弱磁场下分离水中的污染物. 近年来出现的一种新型核-壳结构的磁性纳米材料,磁核可以起到分离粒子的作用,核壳化学修饰后具有功能化的吸附层,从而形成快速、选择性吸附和可降解的反应中心[5].

### 1.2 传感和检验

随着新污染源的出现,水质检验面临许多新的挑战,比如污染物的低浓度、高复杂性等. 如何开发低成本、快速的检测方法,是当下水质检测研究的热点. 而对于诊断消毒、生物膜控制,微生物快速检测是一个主要的研究热点,而这一切都需要开发先进传感器来提供高效、及时响应和靶向治疗.

纳米材料和识别试剂的有效集成(抗体、适配子、碳水化合物和抗菌蛋白等)能够对微生物检测具有快速、灵敏和高选择性. 纳米材料利用它们独特的电化学、光学和磁学性质,能够提高传感响应的灵敏性和响应速度,实现多通道靶向检测. 磁性纳米粒子和碳纳米管可用来做样品浓缩和纯化,提高检测响应速度. 量子点(Quantum dots, QDs)、染料掺杂的纳米粒子、贵金属纳米粒子和磁性纳米粒子已经被广泛应用于传感研究. 量子点有宽的吸收谱和稳定的、窄的荧光发射谱,这种发射谱随着纳米粒子的大小和化学组成而发生改变. 在同一个激发光源下,可以利用多通道实现目标分子的检测. 对于染料掺杂硅和聚合物纳米粒子,由于大量染料分子被限制到单个纳米粒子上,所以表现出较高的荧光强度. 贵金属纳米粒子(纳米金、纳米银等)利用共振表面等离子基元借助光响应可以检测出病原体. 这主要是利用纳米粒子团聚的变化或折射因子的改变. 贵金属纳米粒子还能够增强表面拉曼光谱. 增强因子能够达到 $10^{14}$,所以常常能用于单分子检测. 碳纳米管是另一种优良的电极材料和场效应晶体管. 将碳纳米管包裹在普通电极上(任意、垂直)或形成纳米阵列电极,这样就提高了分析物与检测器的相互作用、缩短电子转移距离,从而提高检测性能[6].

### 1.3 消毒和降解

传统的消毒剂(氯气、臭氧等)很大程度上会造成对水质的二次污染,从而危害公众的饮水健康. 因此需要通过技术创新来形成没有副作用、或副作用较小的消毒剂. 纳米银、纳米氧化锌、纳米二氧化钛、纳米氧化铈、碳纳米管和富勒烯等纳米材料具有较强的抗菌性. 所以这些纳米粒子或通过释放自身有毒的金属离子(纳米银、纳米氧化锌),或直接接触细胞膜(碳纳米管、碳 60、纳米氧化铈),或形成反应活性氧(纳米二氧化钛、富勒醇、氨代富勒烯)[7],实现对微生物生长的钝化. 在此过程中会形成极少量有毒的副产品. 纳米银经常作为一种 point-of-use (POU) 的水处理材料. 因为它表现出强的、宽谱和低毒的抗菌活性. 纳米银的这种抗菌活性主要通过 $Ag^+$ 的释放,释放出的 $Ag^+$ 能够与蛋白中的巯基(-SH)和 DNA 中的磷具有很好的键合作用,从而起到抑制微生物生长的作用.

碳纳米管的纤维结构、抗菌活性和导电性能够应用到抗菌膜中. 碳纳米管和其他碳纳米材料的抗菌作用主要涉及到细胞膜的紊乱和电子结构的氧化扭曲. 短、分散和小直径的金属化碳纳米管毒性更大. 碳纳米管过滤膜也借助电化学过程,在小伏间歇



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性电压的作用下,通过氧化可以机械捕获病毒. 在电泳过程中,致使病毒朝碳纳米管移动.

另一种纳米材料水处理方法是利用太阳光,通过光催化来降解有机污染物和失活病毒. 目前研究的焦点主要集中在增强纳米材料的量子产率、光催化循环次数和设计优化光反应中心[8]. 然而,目前研究结果做到通过靶向吸附来高选择性催化. 提高其催化的选择性,主要依赖于表面化学裁剪光催化设计.

二氧化钛光催化效率通过产生反应活性氧(Reactive oxygen species,ROS),在紫外线的照射下产生超氧和羟基自由基. 相比块状二氧化钛,纳米二氧化钛有更高的光催化活性. 这是由于大比表面积、低电荷/空穴复合比和快速的电子注入的缘故. 然而当二氧化钛离子尺寸小到几个纳米时,将失去光催化活性. 这是由于不能在粒子表面形成电荷和空穴. 所以必需考虑优化纳米粒子的尺寸,使其达到最大的催化效果. 另外也可以通过贵金属的掺杂来减少二氧化钛电荷/空穴复合的几率. 通过对 $TiO_2$ 表面的处理来增加污染物的粘附力. 相比二氧化钛粒子,二氧化钛纳米管有更低的电荷/空穴,由于短的运输路径从而对污染物有更好吸收. 通过各种不同的掺杂,包括金属、染料敏化剂、窄价带半导体和非金属. 结果表明: 通过杂化能级、电子注入、能带变窄等方法,可以拓宽二氧化钛激发谱到可见区范围. 在所有的掺杂体中,氮的非金属掺杂体被认为是最有工业应用前景的廉价掺杂剂[9]. 然而,降低 $TiO_2$ 紫外活性和提高掺杂二氧化钛的稳定性还需要进一步研究.

富勒烯和碳纳米管也是很好的光敏剂[10],也能够产生水中的反应活性氧. 在可见光区激发,氨代富勒烯和富勒醇能够产生单线态氧,这种氧化剂对富电子的有机物有很好的选择性,从而提供了在复杂环境中实现对污染物的原位降解[11].

## 2　展　望

纳米技术提供了实现新一代水处理系统跨越式发展的机会. 在发达国家,纳米技术在水处理的短期应用包括解决当前水处理出现的问题,改造现有的水供应系统; 通过对当前现有设备较小的改动来实现增加水处理容量,并提高效率. 借助纳米技术也可以实现废水的回收利用. 基于净水系统的纳米技术能够改进自来水,通过降低次级污染物,使其成为饮用水和其它高端水质应用(图 2). 同样在发展中国家,纳米技术将使净水系统更便于操作、维修和更新替换,使用更小的电能和化学方法来实现一些特殊的水处理需求. 然而,由于纳米材料价格的昂贵和性能的不稳定,在水处理的工业化方面受到一定限制. 随着科学研究的深入和对未知领域的探索,不久的将来,纳米技术将扮演非常重要的角色,在重塑水处理系统更加持久和作用.

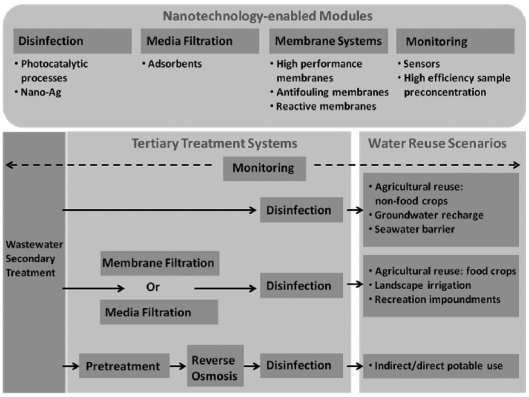



图 2　基于纳米技术模块化设计的废水三级处理系统

## 参　考　文　献

[1] World Health Organization, United Nations Children's Fund. Progress on sanitation and drinking-water 2010 update [J]. WHO/UNICEF, 2010.

[2] Committee on Public Water Supply Distribution Systems: assessing and Reducing Risks, National Research Council. Drinking water distribution systems: assessing and reducing risks [M]. The National Academies Press, 2006.

[3] Auffan M, Rose J, Proux O, et al. Enhanced adsorption of arsenic onto aghemites nanoparticles: As(III) as a probe of the surface structure and heterogeneity [J]. Langmuir, 2008, 24: 3215 – 3222.

[4] Yang K, Xing B S. Adsorption of organic compounds by carbon nanomaterials in aqueous phase: polanyi theory and its application [J]. Chem Rev, 2010, 110: 5989 – 6008.

[5] Theron J, Walker J A, Cloete T E. Nanotechnology and water treatment: applications and emerging opportunities [J].



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Crit Rev Microbiol, 2008, 34: 43 – 69.

[6] Yang W R, Ratinac K R, Ringer S P, et al. Carbon nanomaterials in biosensors: should you use nanotubes or Graphene? [J]. Angew Chem Int Ed, 2010, 49: 114 – 2138.

[7] Li Q L, Mahendra S, Lyon D Y, et al. Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: potential applications and implications [J]. Water Res, 2008, 42: 4591 – 4602.

[8] Chong M N, Jin B, Chow C W K, et al. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review [J]. Water Res, 2010, 44: 2997 – 3027.

[9] Fujishima A, Zhang X T, Tryk D A. $TiO_2$ photocatalysis and related surface phenomena [J]. Surf Sci Rep, 2008, 63: 515 – 582.

[10] Chen C Y, Jafvert C T. The role of surface functionalization in the solar light-induced production of reactive oxygen species by single-walled carbon nanotubes in water [J]. Carbon, 2011, 49: 5099 – 5106.

[11] Lee J, Hong S, Mackeyev Y, et al. Photosensitized oxidation of emerging organic pollutants by tetrakis $C_{60}$ aminofullerene-derivatized silica under visible light irradiation. Environ [J]. Sci Technol, 2011, 45: 10598 – 10604.

# Nanotechnology Application for Water Treatment and Waste-water Reuse

Yang Jiandong

(Department of Agriculture & Forestry, Longnan Normal College, Chengxian, Gansu 742500)

**Abstract**

Ensuring reliable access to clean and affordable water is one of the greatest global challenges of this century. As the world's population increases, water pollution becomes more complex and difficult to remove, and global climate change threatens to exacerbate water scarcity in many areas, hence, waste-water reuse is becoming a common necessity, even as a source of potable water, but our separate waste-water collection and water supply systems are not designed to accommodate this pressing need. Nanotechnology offers opportunities to develop next-generation water supply systems. The paper reviews water supply and waste-water treatment systems based on nanotechnology and nanomaterials.

**Key words:** water source, water supply systems, nanotechnology, waste-water reuse.



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net