**DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.00434**

纳米材料在污染土壤修复及污水净化中应用前景探讨[[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3)

王 萌 1 陈世宝 1\*\* 李 娜 1,2 马义兵 1

（1. 农业部植物营养与养分循环重点实验室 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081;

2. 河北农业大学 保定 071001）

摘 要 近年来, 寻求环境友好型的污染土壤与污水净化高效修复剂成为国内外环境科学研究新的热点。随 着环境分子科学的快速发展, 纳米材料在污染环境修复研究中的应用越来越受到重视, 纳米颗粒由于具有巨 大的比表面积和微界面特征, 可以强化多种界面反应, 如对重金属离子及有机污染物的表面吸附、专性吸附及 增强的氧化-还原反应等, 在重金属及有机污染物等污染土壤及污水治理中有望发挥重要作用。本文综述了目 前国内外利用纳米材料进行污染土壤修复及污水净化的应用研究进展, 并展望了该研究领域的不足及研究前 景, 以期为该研究领域的进一步深入拓展新的思路。

关键词 纳米材料 污染土壤 污水 重金属 有机污染物 修复

中图分类号**:** X505 文献标识码**:** A 文章编号**:** 1671-3990（2010）02-0434-06

A review on the development and application of nano-scale amendment  
in remediating polluted soils and waters  
WANG Meng1, CHEN Shi-Bao1, LI Na1,2, MA Yi-Bing1

（1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture; Institute of Agricultural Resources  
and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China）

**Abstract** Development of high-efficient and environment-friendly amendments and their potential application in remediating pol­luted soils and waters have received a considerable attention in the last decade. With the fast development of environmental molecu­lar material science and engineering, the application of nano-scale materials in remediating polluted soils and waters has gained even more attention in recent times. The unique characteristics of enhanced huge planar surfaces of nano-particles are expected to enable and increase interface reactions. Such reactions include surface and specific adsorption of heavy metallic ions and organic pollutants by asorbents, strengthened oxidation-reduction reactions on planar surfaces, etc. It is predicted that nano-scale amendments will in­creasingly be important in remediating polluted soils and waters. This review therefore highlights current research on application of nano-scale amendments on remediation of polluted soils and waters. Various perspectives of nano-particles with regard to environ­mental cleaning and potential environmental and health impacts associated with the nano-particle application are also presented. The work thus provides vital information for the future development of this field of science.

**Key words** Nano-scale amendment, Polluted soil, Polluted water, Heavy metal, Organic pollutant, Remediation (Received Dec. 21, 2009; accepted Jan. 17, 2010)

近年来, 随着环境分子科学的快速发展, 纳米 材料在污染环境修复研究中越来越受到重视并成为 新的研究热点。纳米材料是指三维空间尺度至少有 —维处于纳米量级（1〜100 nm）的材料，它是由尺寸 介于原子、分子和宏观体系之间的纳米颗粒所组成 的新—代材料。当颗粒尺寸处于纳米量级时, 量子 效应开始影响到物质的性能和结构, 而表现出特殊 的理化性质如小尺寸效应、界面（表面）效应、量子尺 寸效应以及量子隧道效应等［1-2］。纳米材料的特殊理 化性质取决于其颗粒大小（比表面积和分布）、化学构 成（纯度）［3］, 因此, 纳米材料在物理性能如磁、光、 电、热等方面与普通材料有很大不同, 具有吸附、 催化、辐射、吸收等新特性。纳米颗粒由于其大量 的微界面及微孔性, 可以强化各种界面反应, 如对 重金属的表面及专性吸附反应等, 在重金属污染土 壤治理及污水净化中将发挥显著作用。目前纳米技 术在环境污染控制的应用研究主要集中在纳米新材 料的制备与应用技术、环境微界面过程等, 主要包 括氧化物矿物膜及其微界面、气溶胶界面反应、各 种纳米材料制备及其在污染物的催化与降解的应用 等, 具体而言, 主要集中在对有机/无机污染废水处 理、对污染气体的催化净化等领域, 而在污染土壤 修复中的应用还刚刚开始。本文综述了目前国内外 关于利用纳米材料进行污染土壤修复及污水净化的 应用研究进展, 以期为该领域的科学研究提供借鉴 并拓展新的思路。

1. 纳米材料的制备方法与种类 纳米材料制备主要分物理和化学 2 种方法, 其 中物理制备方法主要有真空冷凝法、物理粉碎法及 机械球磨法等, 化学方法则可分为气相沉积法、化 学沉淀法、水热合成法、溶胶凝胶法及微乳液法等 ［4］。目前, 由于操作简单、成本低等特点, 物理粉碎 法、机械球磨法及化学（共）沉淀法（如氧化物类颗粒） 在环境污染防治的纳米材料制备中应用较多, 但相 对于真空冷凝及溶胶凝胶法而言, 上述方法制备的 纳米材料大多具有产品纯度低、颗粒分布不均匀的 特点, 如机械球磨法所制得的颗粒物最大直径可达 300 nm, 其平均粒径与制备物本身的结晶程度有很 大关系。

目前, 国内外在应用于污染土壤修复的环境功 能材料的研制及其应用技术还刚刚起步。文献报道 的用于土壤污染防治及水体净化的纳米修复剂材料 主要包括纳米型（黏土）矿物（如纳米蒙脱土、纳米高 岭土、纳米羟基磷灰石、纳米磷矿粉等）、碳质纳米 材料（如C60材料、单束碳质纳米管等）、金属氧化物 （如 ZnO、 Fe2O3、 Fe3O4、 CrO2 及 TiO2 等）、零价金 属材料（如零价铁、银等）以及各种纳米型聚合物（如 化学传感器、 DNA 芯片等）、半导体材料（如各种纳 米晶粒材料，量子点：QDs）等。近年来纳米材料在环 境污染治理应用方面, 关于利用金属氧化物如 TiO2、 ZnO/WO3 进行污水中金属离子的光催化还原 反应去除污水中无机金属离子（Hg2+, Pb2+, Cr6+等）及 有机污染物的研究有大量报道。随着研究的逐步深 入, 利用不同廉价纳米型（黏土）矿物等进行重金属 污染土壤治理与污水净化的研究越来越受到重视。

1. 纳米材料在污染土壤修复中的应用
   1. 在重金属污染土壤修复中的应用

目前, 对重金属污染土壤的原位修复机制主要 在于增加土壤中重金属离子的吸附、与重金属离子 形成沉淀-共沉淀从而降低重金属离子的迁移转化 特性。无机纳米颗粒类修复剂由于具有巨大微界面, 对土壤中的污染重金属离子具有极强的吸附作用, 这种强吸附作用对降低污染土壤中重金属离子的迁 移、转化及其生物有效性将发挥十分重要的作用。 基于上述思路，Hada等⑸及Gao等同在20世纪末利 用纳米ZnO、TiO2颗粒开展了 Ag+污染土壤修复的 研究，并获得了良好效果。Rajeshwar等［7］发现Cu 包裹的纳米TiO2可对污染土壤中Cr（切）的转化产生 “协同催化效应”，这种效应加速了土壤中Cr（切）的 氧化-还原反应转化，从而对Cr污染土壤的修复治 理产生显著效果。刘义新等［8］提出可利用纳米 TiO2 修复剂进行重金属污染土壤的原位修复, 其固定（沉 淀）机制、沉淀-溶解的动力学过程以及是否会影响 其他营养元素的有效性等问题尚需进一步研究。最 近, 杨俊等［9］采用一次平衡法研究了纳米 TiO2 对土 壤悬液中As（川）的催化氧化及在土壤中对氧化产物 的吸附等，研究表明As（川）的光催化氧化量随TiO2 加入量和光照时间的增加而显著增加，当TiO2加入 量为1.0 g • L-1、光照时间为90 min时对As（川） 可以达到最佳转化效果, 这一研究结果为利用纳 米型修复剂进行As（川）污染土壤的治理提供了新的 思路。

纳米铁颗粒在去除污泥、污水中有毒金属如铬、 铅污染非常有效, 近年来在利用零价铁纳米颗粒进 行污染土壤的修复研究越来越受到重视。当纳米铁 颗粒加入到土壤中, 纳米铁颗粒可通过与污染物进 行吸附、氧化-还原反应减轻或去除污染物毒性。资 料表明［10］, 同量的纳米铁颗粒对降低污染物毒性所 起的作用是传统的铁屑或铁粉的 5 倍。王新新等［11］ 采用纳米铁粉修复不同程度Cr（W）污染的底泥，结 果表明纳米铁粉对底泥中Cr（W）有很好的去除效果, 添加底泥干质量1%（W/W）的纳米铁粉在16 d内 对底泥30~100 mg • kg-1 Cr何）的去除率均高于 99.7%。Yuan和Lien［12］发现纳米铁颗粒在低pH时 可显著提高对 As 的吸附, 减轻土壤环境中 As 的污 染。关晓辉等［13-14］采用自制半透膜水解法合成了纳 米Fe3O4颗粒，并用纳米Fe3O4和浮游球衣菌联合吸 附Pb2+、Cu2+和Cr（W）,结果表明，利用浮游球细菌 包裹后的纳米FesO4吸附Pb2+、Cu2+和Cr何）的效果 大大优于相应条件下单独使用浮游球衣菌的吸附效 果, 对上述重金属离子的吸附选择性为 Pb2+ >Cu2+ >Zn2+>Cd2+。吸附机理的研究结果表明，pH值是影 响复合生物吸附剂吸附Cr(切)的主要因素，吸附的 最佳pH为2〜3［15］。用此复合生物吸附剂对Cr何) 进行吸附，其吸附量达到0.021 7 mmol • g-1。邬玉 琼等［16］以 Fe(NO3)3、MnSO4・H2。、AICI3、NaSiOs 为材料, 采用共沉淀法合成纳米级土壤氧化矿物, 并研究了其对重金属离子如Cu2+、Cr3+等的吸附作 用 , 结果表明将多种氧化矿物混合通过共沉淀法所 合成的土壤氧化矿物比单—氧化物的吸附效果好。 聚Y-谷氨酸(Y-PGA)对金属离子有很好絮凝性，对毒 性重金属具有较高吸附性和结合力。Bodnar等［17］采 用密度测定法描述絮凝物的沉降, 通过浑浊度试验 测定在不同pH值和Y-PGA/Pb2+组成比例条件下絮 凝物的热力学特性, 结果表明, 在—定浓度的聚合 物和Pb2+存在时，土壤中的絮凝体会发生絮凝和沉 淀, 高浓度组分和低 pH 条件能促进大的聚集体形 成。y-PAG纳米颗粒对Pb2+的强络合能力验证了可 使用该吸附剂对土壤中的重金属进行原位固定。 Xu 和Zhao［18］在实验室中测试了以乙二胺为核心的聚 胺树状聚合物从土壤中去除铜的效果, 结果表明, 树状高分子聚合物对土壤中铜的去除率可达到 54%。最近, 陈杰华等［19］通过室内培养试验, 研究了 纳米羟基磷灰石对土壤重金属的固定和修复研究, 并通过毒性溶出试验 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure)对固定效果进行了评价，结果表 明，纳米羟基磷灰石的施入显著降低了土壤中Cu和 Zn的生物有效性，且土壤中Cu和Zn有效态含量与 纳米羟基磷灰石的施用量呈显著负相关。

从上述研究资料可以看出, 目前进行的利用纳 米型修复剂进行污染土壤修复研究大多数集中于对 降低土壤中重金属生物有效性效果的观察, 而对相 关机理研究偏少。随着研究的逐步深入, 通过对施 入土壤中的纳米颗粒与重金属离子吸附行为的进— 步研究, 将拓宽不同纳米颗粒在处理无机污染物中 的应用范围, 包括那些光催化活性很低的纳米颗 粒，如对 Cd2+、A13+、As3+、SeO2、Mn2+等离子的 吸附［20］。

* 1. 纳米材料在有机物污染土壤修复中的应用

土壤光催化降解(光解)是—项新兴的有机物污 染土壤原位修复技术, 在农药等污染土壤的修复中 将具有广阔的应用前景。随着纳米型氧化物催化技 术、黏土矿物改性技术等在土壤环境和农业生产领 域应用的逐渐渗透, 利用纳米铁粉、 TiO2 等去除污 染土壤和地下水中的有机氯等污染物的研究越来越 受到重视。如卡内基梅隆大学(CMU)和爱达荷州国 家环境工程实验室的研究人员目前正在用纳米型氧 化物材料进行受三氯乙烯(TCE, —种广泛用于金属 除油的致癌溶剂)污染土壤的修复, 以替代传统的处 理方法［21］°Nakagawa等［21］先用磁芯电抗铁将含氯有 机溶剂快速降解成无毒无害产物, 然后采用原子转 移自由基聚合(ATRP )技术给含铁分子包裹两层聚合 体壳, 使不同结构和功能的组分被以纳米形式加入 到合成的颗粒中。颗粒外面的—层聚合体壳具有亲 水性, 使颗粒易于在土壤空隙中迁移而顺利接近 TCE, 颗粒里面—层疏水壳则让它停留在水和 TCE 分界面上, 之后颗粒核芯中的铁就可以有效降解有 毒有机物。苏碧桃等［22］利用酸催化的溶胶-凝胶 (Sol-Gel)法制备了纳米TiO2半导体催化剂，并利用 环己烷在其上的光催化氧化进行了结构与其催化性 能关系的研究, 结果表明, 室温条件下 TiO2 纳米颗 粒可催化环己烷中很难活化的 C—H 键降解, 转化 为环己醇; 同样, 孙奉玉等［23］发现, 当 TiO2 晶粒粒 径从 30 nm 减小到 10 nm 时, 其光催化降解苯酚的 效率提高近 45%。潘淑颖等［24］发现添加纳米 TiO2 可以显著促进土壤溶液中的有机氯农药降解。除 TiO2外，纳米ZnO颗粒作为具有独特功能的光催化 材料，其在土壤和水中有机污染物的监测和降解方 面所起的作用也越来越受到关注。 Kamat 等［25］发现 纳米ZnO薄膜对约1 mg •kg-1的芳香族化合物氯化 酚有很高的敏感度, 在紫外灯照射下, 纳米 ZnO 薄 膜可以快速降解芳香族化合物。

除纳米TiO2及ZnO颗粒外，纳米铁颗粒及铁与 其他金属复合颗粒由于具有巨大的表面积和高的表 面活性, 在有机污染土壤原位修复中也具有很大的 应用前景［26］。研究表明［27-29］, 纳米铁颗粒对很多环 境污染物如污染土壤和溶液中的有机氯溶剂、有机 氯农药和多氯联苯污染物等具有高效的转化性和脱 毒作用oZhang［27 ］研究了纳米铁颗粒对土壤中有机氯 化物的脱氯效果, 结果表明, 在纳米铁颗粒加入土 壤后的几天内, 可观察到测试位点处迅速发生反应, 三氯乙烯(TCE)浓度降解效率达99%,且纳米铁颗 粒可与土壤中有机污染物保持 4〜8 周的反应活性。 同样, Quinn 等［30］通过试验证明零价纳米型铁颗粒 对三氯乙烯(TCE)污染土壤具有较好的修复效果, 但其主要降解机制及影响因素还有待进—步研究。 除纳米铁颗粒外, 其他金属与铁复合纳米型颗粒也 可以产生类似结果。有研究表明［30-33］, 铁/镍、铁/ 铜及铁/铂双金属纳米颗粒可显著降解污染土壤中 的三氯乙烷、三氯乙烯及氯化苯污染物。

利用合成的纳米型有机聚合物对污染土壤中的 有机污染物吸附, 以降低有机污染物的迁移、转化 特性成为近年来有机污染土壤修复新的研究热点之 一。袁才登等［34］利用两性聚氨酯丙烯酸非离子离聚 物(UANs)合成了两性聚氨酯(APU)纳米颗粒并对菲 污染土壤进行了修复研究，结果表明，聚氨酯(APU) 纳米颗粒可以将菲在其憎水相内溶解, 有效去除了 土壤中被吸附的菲, 而通过超滤工艺可将土壤中的 APU 颗粒进行很好地回收再处理。 Tungittiplakorn 等［35-36］通过试验证明两性聚氨酯(APU)纳米颗粒能 够有效吸附沙质土壤中的菲，而通过改变APU颗粒 结构可控制其吸附性能, 如增加疏水性基主链的长 度可显著提高对菲的吸附性, 但该颗粒是否适合修 复不同类型的土壤及将APU颗粒进行高效回收和循 环利用等问题还有待进一步研究。

* 1. 纳米材料在污水净化中的应用研究

传统的污水处理方法效率低、成本高、存在二 次污染, 而纳米技术的发展和应用很可能彻底解决 这些问题。目前, 纳米材料在污水净化中的应用技 术主要包括纳米过滤技术、纳米光催化技术及纳米 吸附材料等。纳米技术净化水的主要机制在于利用 装有纳米磁性物质、纤维和活性炭，带有纳米孔径 的特殊水处理膜或不同纳米孔径的陶瓷小球处理装 置, 对污水中的有机、无机污染物进行吸附、催化 降解或进行氧化-还原反应，有效除去水中的目标 污染物。半导体光催化剂不仅具备许多传统催化剂 的特性, 而且可通过吸收光线获得能量, 而纳米技 术进一步扩展了半导体光催化应用领域, 如 TiO2、 ZnO、 Fe2O3 和 WO3 等一些纳米材料的应用。李菲 菲等［37］利用半导体纳米颗粒对污水中的污染物进行 光催化氧化降解, 发现半导体纳米颗粒在与目标污 染物进行反应过程中颗粒表面会产生氧化能力极强 的羟基自由基COH),能够使污水中大多数有机污染 物及部分无机污染物彻底氧化降解为CO2和H2O等 无害物质［38］。半导体TiO2颗粒的禁带宽度为3.2 eV, 能量大于或等于禁带宽度的光照射TiO2颗粒表面后, 颗粒价带上的电子(e-)被激发跃迁到导带上并在价 带上产生相应的空穴(h+), e-在电场作用下分离并迁 移到颗粒表面。光生空穴的得电子能力很强, 具有 很强的氧化性, 在水溶液中通过一系列的相互作用 产生・OH自由基，而・OH是光催化反应的主要活性 物质来源。在・OH自由基的强氧化性作用下，能有效 将有机污染物氧化为 CO2 和 H2O 等简单的无机 物［39-40］。类似的研究发现纳米级锐钛矿型TiO2晶体 颗粒同样具有很高的光催化功能, 目前用于光催化 反应的TiO2大多都制备成锐钛矿型颗粒，这主要与 其微观结构有关［41-42］。 Haradak 等［43］曾利用纳米型 光催化颗粒对污水中 30 多种有机污染物的光催化 分解进行了降解效果研究, 结果表明光催化纳米颗 粒可将烃类、卤化物、羧酸、表面活性剂、染料、 含氮有机物、有机农药等污染物较快地完全氧化成 CO2和H2O,且该技术具有降解速度快、氧化条件温 和、无专一选择性、无二次污染及应用范围广等特 点, 在污水净化技术方面显示出了重要地位［2,43-44］。

* 1. 纳米材料在污染土壤修复应用中的环境安全性

目前, 目标土壤修复的纳米型环境功能材料的 研制及其应用技术还刚刚起步, 具有十分广阔的发 展前景, 但纳米型环境功能材料在土壤中的分配、 反应、行为、归趋及生态毒理等尚缺乏了解, 对其 环境安全性和生态健康风险还难以进行科学评估, 基于环境功能修复材料的土壤修复技术的应用条 件、长期效果、生态影响和环境风险有待回答。与 宏观尺度修复材料(微米级)相比, 纳米颗粒特定的 尺寸使它们可以穿越障碍从而到达环境及生物体无 法到达的地方, 例如一些具表面化学特性的纳米颗 粒可跨过内皮膜进入植物体导管, 也可在土壤沉积 物-胶体-水体中轻易地移动，这些特性使其在环境 修复中得到广泛应用的同时也产生了潜在的环境风 险, 如纳米颗粒在水体和土壤中与污染物结合体在 食物链中的富集等［45-46］。Auffan等［47］对金属纳米颗 粒的特性及其体外毒性与其化学稳定性间的关系进 行了研究, 结果表明化学性质稳定的金属纳米颗粒 本身并没有细胞毒性, 然而被氧化或溶解了的金属 纳米颗粒具有明显的细胞毒性和遗传毒性。 Hoecke 等［48］通过电子显微镜等技术研究SiO2纳米颗粒对藻 类生长的影响发现, SiO2 纳米颗粒可被吸附在细胞 壁上从而对藻类产生相应的生态毒性, 这一结果也 验证了纳米颗粒可能与生物体表面相互作用从而产 生生理毒性的可能。Moore［49］研究了纳米颗粒对水 生生物毒性的影响表明, 纳米颗粒可以单独或与溶 液胶体一起进入生物体细胞或组织并产生生物毒性 效应, 而细胞的内吞作用被证明是纳米颗粒进入细 胞质的主要机制。

在污染土壤修复应用中，纳米材料通过土壤- 植物系统中的迁移、富集进而通过食物链进入人体, 被认为是纳米颗粒在陆地生态环境中更高层次的环 境风险, 可见, 对新的纳米材料的环境健康风险进 行研究具有十分重要的意义。尽管目前还不能确定 纳米材料对土壤生态系统的环境危害程度, 但针对 纳米颗粒的环境安全性研究越来越受到重视。主要 包括： 1) 功能化纳米材料的环境安全性评价方法的 建立。纳米材料的特殊物理化学性质决定了其危险 性评价方法与常规材料不尽相同, 所以纳米材料生 态危险性评价的研究策略及测定方法的建立非常重 要, 但目前并没有国际认可的统一方法, 应引起研 究者的重点关注。 2) 对功能化纳米材料的环境暴露 评价体系研究。暴露评价对于研究纳米材料的安全 性非常关键, 明确纳米材料环境释放的途径和程度 是首要解决的问题。针对纳米材料的物理化学特性, 需要发展新的环境风险监测方法及检测仪器, 目前 暴露研究进展缓慢的原因主要在于缺乏适用于纳米 材料监测的有效方法及工具。 3) 纳米材料的环境行 为研究。纳米材料可在土壤、大气和水体环境之间 迁移或转化, 因此, 建立新的或修改已有的颗粒迁 移、转化模型以研究纳米材料在不同环境中的迁移 规律、生物蓄积和生物降解过程及可能的特性改变 将具有十分重要的意义。 4) 纳米材料的生态毒性研 究。纳米材料在土壤及水生态系统中的转归、毒性 (包括对微生物、动物及植物的毒性作用)以及其他效 应(如理化特性的改变、生物体内稳定性、与其他环 境污染物如金属或有机物的交互作用等)的研究等。 此外, 在环境治理研究中, 纳米材料在发挥治理污 染作用的同时是否会造成环境对纳米材料的超负荷, 是否会产生一些其他的损害后果如增加污染物的生 物活性及迁移、转化能力等也有待进一步研究[1]。

1. 研究展望

在污染土壤治理及污水净化研究领域, 纳米颗 粒在对重金属、有机污染物的表面吸附、专性吸附 及增强的催化降解、氧化-还原反应等的优势是传统 物理、化学方法和材料所无法代替的。尽管目前纳 米技术在土壤污染环境治理、功能保育及环境安全 性方面的研究相对薄弱, 但已有部分研究者对此进 行了一些探索性的工作并取得了重要进展。随着纳 米技术基础研究的深入和实用化进程的发展, 纳米 技术在环境保护和污染治理方面的应用已显现出欣 欣向荣的景象。但从目前发表的有关纳米技术科技 论文和发明专利情况分析, 将纳米技术应用到污染 土壤的修复及环境安全性方面的研究相对薄弱, 主 要问题包括： 1) 有些纳米修复技术还停留在实验室 阶段, 没有形成产业化, 实际应用还比较少, 应用 过程中的外界因素影响也是需要研究的内容, 而且 对纳米金属铁颗粒降解环境污染物的具体机理研究 还不很充分; 2) 纳米颗粒可否进入食物链浓缩富集 及动植物对纳米颗粒的摄入量及其机理还有待进一 步研究; 3) 纳米材料在土壤环境中的风险还缺乏深 入研究, 包括对土壤物理、化学性质变化的影响尚 不清楚, 如对土壤的通透性、保水保肥性及对土壤 微生物的影响等, 尽管目前已有试验研究表明土壤 中的纳米颗粒对菌落形成、土壤微生物新陈代谢等 有显著影响[51], 但并未进行机理方面研究, 且中间 代谢过程还没有探明; 4) 目前有关纳米材料的尺 度、形貌对毒性的影响及纳米材料与其他物质相互 作用(包括外界环境如温场、光场、 pH 值对暴露在 环境中的纳米颗粒行为的影响等)可能带来的安全 风险等方面的研究也基本处于空白状态, 因此, 进 一步明确划分纳米尺度有毒化学物质的机理和范围 对防范这些物质在应用过程中对环境安全造成的危 害将具有十分重要的意义。

参考文献

1. 卓成林, 伍明华. 纳米材料在环境保护方面的最新应用进 展[J].化工时刊，2004, 18(3): 5-7, 18
2. 汪多.层状硅酸盐复合材料的开发与应用进展J].无机盐 技术, 2006(2): 8-19
3. 章军, 杨军, 朱心强. 纳米材料的环境和生态毒理学研究 进展[J].生态毒理学报，2006, 1(4): 350-356
4. Klaine S J, Alvarez P J J, Batley G E, et al*.* Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and ef- fects[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(9): 1825-1851
5. 喻德忠, 蔡汝秀, 潘祖亭. 纳米技术在处理环境中无机污 染物的研究现状[J].分析科学学报，2003, 19(4): 389-394
6. Gao Y M, Lee W, Trehan R, et al. Improvement of photocatalytic activity of titanium (IV) oxide by dispersion of Au on TiO2, Mater Res Bull[J]. 1991, 26(12): 1247-1254
7. Rajeshwar K, Chenthamarakshun C R, Goeringer S, et al. Ti­tania-based heterogeneous photocatalysis. Materials, mecha­nistic issues and implications for environmental remedia- tion[J]. Pure and Applied Chemistry, 2001, 73(12): 1849-1860
8. 刘义新, 孟丽, 华齐帅, 等. 利用纳米二氧化钛原位固定土 壤重金属的可行性探讨[M]//中国环境科学学会.中国环境 科学学会学术年会优秀论文集. 北京: 中国环境科学出版 社, 2008: 1104-1108
9. 杨俊，徐仁扣.纳米TiO2协助下As(III)在可变电荷土壤中 的光催化氧化和吸附[J].环境科学，2008, 29(11): 3219-3224
10. Niall O, Enda C. Recent developments in nanotechnology and risk assessment strategies for addressing public and environ­mental health concerns[J]. Human and Ecological Risk As­sessment, 2008, 14(3): 568-592
11. 王新新, 张颖, 王元芬. 底泥铬污染的纳米铁粉修复及其 土壤酶活性动态[J].生态环境，2008, 17(5): 2207-2211
12. Yuan C, Lien H L. Removal of arsenate from aqueous solution using nanoscale iron particles. Special issue: Arsenic in wa- ter[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2006, 41(2): 25, 210-215
13. 关晓辉，赵洁，秦玉春.纳米FesO4的制备及其辅助吸附重 金属离子的特性[J].环境化学，2005, 24(4): 409-412
14. 关晓辉, 秦玉春, 王立文, 等. 纳米 Fe3O4 负载的浮游球衣 菌去除重金属离子的工艺研究[J].环境科学，2007, 28(2): 436-440
15. 关晓辉, 秦玉春, 秦玉华, 等. 纳米 Fe3O4 负载的浮游球衣

菌去除 Cr(VI)的研究[J].环境科学，2007, 28(9): 2096-2100

1. 邬玉琼, 徐娟, 李程, 等. 纳米级土壤氧化矿物合成及其对 重金属离子吸附的研究J].湖北农业科学，2005(3): 72-74
2. Bodnar M, Kj0niksen A L, Molnar R M, et al. Nanoparticles formed by complexation of poly-gamma-glutamic acid with lead ions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153: 1185 -1192
3. Xu Y H, Zhao D Y. Removal of copper from contaminated soil by use of poly (amidoamine) dendrimers[J]. Environ­mental Science and Technology, 2005, 39(7): 2369-2375
4. 陈杰华，王玉军，王汉卫，等.基于TCLP法研究纳米羟基 磷灰石对污染土壤重金属的固定[J].农业环境科学学报， 2009, 28(4): 645-648
5. 喻德忠, 蔡汝秀, 潘祖亭. 纳米技术在处理环境中无机污 染物的研究现状[J].分析科学学报，2003, 19(4): 389-394
6. Nakagawa Y, Matyjaszewski K. Synthesis of well-defined allyl end-functionalized polystyrene by atom transfer radical polymerization with an allyl halide initiator[J]. Polymer Journal, 1998, 26(3): 1012-1019
7. 苏碧桃, 孙丽萍, 孙巧珍, 等. 纳米二氧化钛催化剂的制备 及其光催化性能[J].兰州大学学报：自然科学版，2000, 36(6): 75-78
8. 孙奉玉, 吴鸣, 李文钏, 等. 二氧化钛的尺寸与光催化活性 的关系[J].催化学报，1998, 19(3): 229-233
9. 潘淑颖, 徐保民, 索秋魁, 等. 纳米 TiO2 与过渡金属协同 作用光催化氧化土壤渗出液中DDT的研究[J].安徽农业科 学, 2006, 34(21): 5601-5602
10. Kamat P V, Huehn R, Nicolaescu R. A “sense and shoot” ap­proach for photocatalytic degradation of organic contaminants in water[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2002, 106(4): 788-794
11. Otto M, Floyd M, Bajpai S. Nanotechnology for site remedia- tion[J]. Remediation Journal, 2008, 19(1): 99-108
12. Zhang W X. Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview[J]. Journal of Nanoparticle Re­search, 2003, 5: 323-332
13. Wang C B, Zhang W X. Synthesizing nanoscale iron particles

for rapid and complete dechlorination of TCE and PCBs[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(7):

2154-2156

1. Liu Y Q, Majetich S A, Tilton R D, et al*.* TCE dechlorination rates, pathways, and efficiency of nanoscale iron particles with different properties[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(5): 1338-1345
2. Quinn J, Geiger C, Clausen C, et al*.* Field demonstration of

DNAPL dehalogenation using emulsified zero-valent iron[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(5):

1309-1318

1. Lien H L, Zhang W X. Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethenes[J]. Colloids and Surfaces, 2001, 191: 97-105
2. Schrick B, Blough J L, Jones A D, et al. Hydrodechlorination of trichloroethylene to hydrocarbons using bimetallic nickel-iron nanoparticles[J]. Chemical Materials, 2002, 14(12): 5140-5147
3. Phenrat T, Long T C, Lowry G V, et al*.* Partial oxidation (“aging”) and surface modification decrease the toxicity of nanosized zerovalent iron[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(1): 195-200
4. 袁才登, 曹建伟. 聚氨酯纳米粒子的合成及其在土壤净化 中的应用[J].网络聚合物材料通讯,2006, 1(5): 11-18
5. Tungittiplakorn W, Lion L W, Cohen C, et al. Engineered polymeric nanoparticles for soil remediation[J]. Environ­mental Science and Technology, 2004, 38(5): 1605-1610
6. Tungittiplakorn W, Cohen C, Lion L W, et al. Engineered polymeric nanoparticles for bioremediation of hydrophobic contaminants[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(5): 1354-1358
7. 李菲菲，曾维华.纳米技术在环境污染防治中的应用[J]. 化工环保, 2004, 24(6): 426-428
8. 张泽江, 张硕生, 冯良荣, 等. 纳米材料在环境保护中的应 用与发展[J].四川环境，2004, 23(2): 4-5
9. Nagaveni K, Sivalingam G, Hegde M S, et al. Photocatalytic degradation of organic compounds over combustion synthe­sized nano-TiO2[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(5): 1600-1604
10. 任清褒, 麻锦红, 周振春. 纳米材料及技术在环境保护 领域的应用现状和前景[J].丽水学院学报，2005, 27(2): 28-32
11. Kelichit T. Effect of crystallinity of TiO2 on its photocatalys- tic action[J]. Chem Phys Lett, 1993, 187(12): 73-78
12. 庄惠芳, 赖跃坤, 李静, 等. 高度有序的二氧化钛纳米管阵 列的制备及其光催化活性的研究[J].化学学报，2007, 65(21): 2363-2369
13. 韩玮.绿色化学、纳米技术与环境保护[J].中国环保产业， 2004(8): 46-48
14. National Research Council. Innovation in ground water and soil cleanup: From concept to commercialization[M]. Wash­ington D C: National Academy Press, 1997
15. Tinkle S S. Nanotechnology: Anotechnology collaborative

opportunities for ecotoxicology and environmental health[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 9:

1823-1824

1. 汪冰, 丰伟悦, 赵宇亮, 等. 纳米材料生物效应及其毒理学 研究进展[J].中国科学B辑：化学，2005, 35(1): 1-10
2. Auffan M, Rose J, Wiesner M R, et al*.* Chemical stability of metallic nanoparticles: A parameter controlling their potential cellular toxicity *in vitro*[J]. Environ Pollut, 2009, 157(4): 1127-1133
3. Hoecke K A V, Schamphelaere K A C D, Meeren P V D, et al. Ecotoxicity of silica nanoparticles to the green alga *Pseu- dokirchneriella subcapitata*: Importance of surface area[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(9): 1948-1957
4. Moore M N. Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment?[J]. Environment International, 2006, 32: 967-976
5. Shah V, Belozerova I. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds[J]. Water Air Soil Pollut, 2009, 197: 143-148

1. 国家高技术研究发展计划（863计划）项目（2008AA10Z404, 2006AA06Z360）及农业部公益性行业科研专项（20083034）资助 [↑](#footnote-ref-2)
2. 通讯作者：陈世宝（1971〜），男，博士，副研究员，主要从事重金属污染与防治方面研究。E-mail: [sbchen@caas.ac.cn](mailto:sbchen@caas.ac.cn) 王萌（1987〜）, 女, 硕士研究生, 研究方向为重金属污染与防治。 E-mail: [wangmeng19880204@163.com](mailto:wangmeng19880204@163.com)

   收稿日期: 2009-12-21 接受日期: 2010-01-17 [↑](#footnote-ref-3)