

# 可吸入矿物细颗粒物与微生物的相互作用

董发勤<sup>1</sup>, 代群威<sup>1</sup>, 贺小春<sup>1</sup>, 邓建军<sup>2</sup>, 唐朝军<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 教育部废物处理与资源化重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 绵阳市第四人民医院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 矿物细颗粒物和微生物个体都是大气颗粒物(PM)重要组成部分,它们在形态、共生关系和空气动力学行为上均有高关联度。本文对可吸入颗粒物(IP)和可吸入矿物细颗粒(IMG)的颗粒特性、自由基和生物活性、IP和IMG与微生物相互作用效果的研究现状做了阐述,指出大气颗粒物与微生物的相互作用的重要性。提出今后应重点研究可吸入矿物细颗粒物的环境化学与微生物作用行为,研究IMG-微生物体系近尺寸作用体系中的尺寸效应、界膜作用等对矿物颗粒物表面形态、表面电性、表面基团及自由基等的影响,分泌蛋白质与相变、元素变价、溶解(络合)的关系以及由此引起的颗粒物活性和生物毒性的变化等。

**关键词:** 可吸入矿物细颗粒; 界膜作用; 微生物; 自由基; 近尺寸效应

中图分类号: P57; Q939.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)06-0611-06

## The interaction between inhalable mineral granules and microorganisms

DONG Fa-qin<sup>1</sup>, DAI Qun-wei<sup>1</sup>, HE Xiao-chun<sup>1</sup>, DENG Jian-jun<sup>2</sup> and TANG Chao-jun<sup>1</sup>

(1. Waste Treatment and Resource Recycle Key Laboratory of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. No. 4 People's Hospital, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Both mineral granules and microorganism individuals are important components of atmospheric particulate matter (PM), having high relationship in morphology, association and aerodynamic behaviors. This paper has expounded the granule characteristics, free radical and biological activity as well as the effect of interaction between IP, IMG and microorganisms and pointed out the importance of the interaction between atmospheric particles and microorganisms. In future, the emphasis of the study should be placed on environmental chemistry and microorganism behaviors, the size effect and boundary film effect in the near size effect system of the IMG-microorganism system on surface morphology, surface electrical property, surface group and free radical of mineral particles, the relationship of the secretion of protein to the phase transition, the element variable valence and the solution (complexation) as well as the diversification of particle activity and biological toxicity caused by these factors.

**Key words:** inhalable mineral granules; boundary film effect; microorganisms; free radical; near size effect

随着生活和文化水平的日益提高,空气污染问题已引起人们的广泛关注。我国大气污染非常严重,在2006年世界卫生组织公布的全球空气污染城市排名中,中国有16个城市位列前20名。并且据估计,我国环境污染造成的经济损失约2000亿元,其中大气污染造成的损失占总损失的16%左右,因总悬浮颗粒物影响导致人体健康损失估计为190亿元。

目前,大气颗粒物(particulate matter, PM)已成为造成空

气污染最主要的来源,其粒径范围在0.01~100 μm之间(Borm, 2002)。PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>分别指空气动力学直径 $D_a \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物,均为可吸入颗粒(inhalable particles, IP),是室内外环境空气质量的重要监测指标。PM<sub>2.5</sub>可进入血液系统,直接导致心血管等疾病。可吸入矿物细颗粒(inhalable mineral granules, IMG)是指小于 $10 \mu\text{m}$ 的各种自然和人工过程中生成天然矿物粉尘(人工生成的单质C可

收稿日期: 2009-07-22; 修订日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10776027)

作者简介: 董发勤(1963-),男,汉族,博士,教授,博士生导师,主要从事环境协调矿物材料研究, E-mail: fqdong@swust.edu.cn

归入(因与之特性相近),它常是某些区域如乡村、工地的主要大气污染物。IMG 的最大特征是除了粒度外还有物相、结构、成分的指标。

大气悬浮颗粒物污染逐渐受到人们的重视,国内外涌现出大量相关研究,特别是 IP 和 IMG 的研究报道(Rattigan *et al.*, 2006; 郭涛等, 2009; 孙俊玲等, 2009)。矿物细颗粒物和微生物个体都是大气颗粒物的重要组成部分,它们在形态、共生关系和空气动力学行为上均有高关联度。但人们对微生物个体远没有对矿物质颗粒物认识那么深入,对它们的相互作用也研究不多。人们大多注重于大气颗粒物本身给人类带来的危害,而大气颗粒物与空气中微生物相互作用过程中,除了作为其载体、营养源之外,还可能会由于颗粒物本身的尺寸效应、表面活性以及组分毒性等对这些微生物本身产生影响,从而加大其对人类的联合危害程度并扩大传播途径。颗粒物-微生物作用体系中颗粒物表面形貌与活性、毒性成分与强度以及颗粒物间团聚程度等也会因微生物的作用而改变。另外,对于可吸入性矿物细颗粒物与大气直接接触的鼻腔、口腔等器官和皮肤表面正常菌群作用后,是否会导致这些微生物的数量、形态、黏附性等发生变化,并且微生物的变异、毒性加大及新毒性因子的产生等还不清楚。因此,应重视颗粒物-微生物作用体系中二者相互作用的研究。

本文主要对目前 IP 和 IMG 的特性、生物活性、自由基以及及与微生物的作用效果的国内外现状进行了综述,此外,还阐述了目前研究的不足及研究展望。

## 1 IMG 环境行为特性研究

IMG 的相特征、吸附特性、自由基分布与迁移特征,各种介质处理、团聚性、分散性、吸附痕量(重)金属、有机污染物或其他类似物质的变化,环境生物的作用活性都属于颗粒物的环境行为。

### 1.1 IMG 的特性研究

细微颗粒物  $PM_{2.5}$  已成为国际上大气污染研究领域的热点和前沿,目前大多数研究集中对 PM 的浓度、化学组分、物理成分和来源进行调查分析。在美国,Rattigan 等(2006)对纽约城区和农村多年大气中  $PM_{2.5}$  中硫酸盐和硝酸盐成分进行了间断测试,结果表明气温较高月份的硫酸盐含量比较高,而冬季硝酸盐含量最高。另外,Tasic 等(2006)对南斯拉夫首都贝尔格莱德城区大气中  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的物化特性进行了研究,并根据颗粒物成分和表面携带化合物将它们分为煤烟型、硫酸盐型、富硅型、富金属型和生物型等多种颗粒物。我国学者重点对香港(Ho *et al.*, 2006)、北京(Song *et al.*, 2006)、上海(Feng *et al.*, 2006)、广州(Wang *et al.*, 2006a)等大城市大气颗粒物组成特征、污染源、污染状况、季节变化特征以及室内空气颗粒物特征(Wang *et al.*, 2006b)进行了调查研究。徐旭常院士领导的课题组通过对“燃烧过程中 IP 的生成及环境影响”研究认为,重金属和有机污染物是燃烧过

程中重要的可吸入颗粒物源。

近年来,对可吸入大气颗粒物中的矿物组成特征研究逐渐受到关注,笔者(董发勤等, 2005b)对我国北方及四川北部粉尘物相形态进行了研究,分析表明我国北方部分地区大气粉尘中微小颗粒集中分布在  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$  内,主要以 Si、Al、Fe、Ca 等风沙和土壤的地壳元素和石英、钠长石、方解石、绢云母矿物相为主。邵龙义领导的课题组对北京市可吸入颗粒物特征从矿物学角度进行了系统分析(邵龙义等, 2007),重点研究了其中矿物成分的组成、微观形貌、粒度分布以及季节变化特征等,鉴定出了伊利石、石英、方解石等 38 种矿物成分。张强华等(2008)应用扫描电镜对南京市两典型地区  $PM_{10}$  中颗粒的微观形貌及其矿物组成进行了研究,结果表明南京市大厂区(典型工业区)  $PM_{10}$  中的颗粒多以形态规则矿物颗粒为主,山西路地区(典型商业区)  $PM_{10}$  中的颗粒多以形态不规则出现,形态规则颗粒主要是碳酸盐、硫酸盐和铝硅酸盐矿物,形态不规则颗粒主要是烟尘结合体、生物质和原生矿物。

### 1.2 IMG 及其引发的自由基研究

自由基,化学上也称为游离基,是含有一个不成对电子的原子团。可吸入性颗粒物中自由基的种类有半醌类自由基和活性氧自由基如羟基自由基、超氧阴离子自由基。粉尘产生的自由基主要来自两方面:粉尘本身特殊的表面化学特征和吸附的过渡金属元素而产生自由基;粉尘刺激巨噬细胞而产生自由基。自由基产生后,主要作用于脂质、蛋白质、DNA,引起膜脂质过氧化、蛋白质氧化或水解,诱导或抑制蛋白酶活性、DNA 损伤等。Briede 等利用电子顺磁共振(ESR)法测定不同来源的颗粒物  $PM_{10}$  氧自由基形态,研究表明,城市中氧自由基的产量与多环芳烃和个别过渡金属元素含量有关(Briede *et al.*, 2005)。笔者等对多种矿物粉尘释放自由基的研究方法进行了系统分析,并对我国北方大气降尘液相自由基进行研究,结果表明矿物表面基团具有高度的活性,能与 DNA 和染色体发生直接或间接的相互作用,影响粉尘的生物效应(董发勤等, 2005a)。

### 1.3 IMG 的生物活性研究

可吸入颗粒物若与生物体内细胞产生较强的生物化学作用即表现为生物活性(biological activity)。国内近年来对可吸入颗粒物生物活性的研究处于细胞水平,主要是对颗粒物的致毒效应的研究,对其相关生化机制、免疫细胞因子研究逐渐增多。曹强等(2008)研究了大气细颗粒物水溶成分和非水溶成分对人肺癌上皮细胞株 A549 细胞的毒性,结果表明水溶成分是最主要的毒性成分之一。

对沙尘暴颗粒物的生物活性也进行了较多研究(Wei and Meng, 2006; Guo *et al.*, 2006),且研究的重点逐渐由  $PM_{10}$  向  $PM_{2.5}$  转变,这正是人们在研究过程中认识到  $PM_{2.5}$  的生物活性更强的缘故。

对颗粒物毒性机理方面开展的相关研究,主要是利用颗粒物提取物的遗传毒性及其对免疫功能的影响(Wei and Meng, 2006),也有对特殊(污染)环境下  $PM_{2.5}$  及其提取物的

细胞毒性研究(Deng *et al.*, 2006)。毒性对象主要为支气管模型和纤维细胞(HLF)模型(米生权等, 2005b),可利用大鼠进行动物实验(邓芙蓉等, 2009)。

大气颗粒物具有遗传毒性,它可以使细胞的 DNA 发生突变并且可以通过雄性生殖细胞传递给下一代,从而说明了它的更大危害性。张华山等(2008)研究表明纳米颗粒物对大鼠妊娠结局及其子代近期记忆有影响。

国外研究可吸入颗粒物的体外细胞毒性试验,集中在  $PM_{2.5}$  和部分矿物、纳米颗粒物的遗传毒性和非遗传毒性上。研究发现污染源不同、污染源距离不同,产生的毒性作用程度不同。Sheesley 等(2005)用水生生物测定法对美国某城市不同地点的环境大气颗粒物毒性进行了对比研究,发现其中存在明显的差异性。Kleinman 等(2005)研究了交通繁忙地段可吸入颗粒物对老鼠气管的炎症存在恶化和变态反应,且随着与污染源的距離增加而减弱。Dagher 等(2006)通过对  $PM_{2.5}$  有机、无机和重金属组分分析以及体外作用实验,结果发现短期暴露与  $PM_{2.5}$  可在 L132 细胞中诱导病变。

笔者课题组自 1997 年开始,从矿物/生物界面作用角度出发,对矿物粉尘的生物活性进行了较为系统的研究,特别是对矿物-巨噬细胞体、矿物粉尘-人体 Gamble 体系、人体氨基酸-维生素体系、人体血清体系作用过程和产物及影响因素进行了系统研究,结果表明矿物粉尘本身或刺激吞噬细胞而产生的自由基对脂质过氧化、遗传毒性和细胞毒性起着重要作用,并且矿物粉尘表面活性基团影响粉尘的生物效应,对人体的有害影响是通过其界面性质、化学性质、带电性以及力学性和尺寸大小来形成的。表面特性在对细胞的损害和粉尘性疾病的形成中起着至关重要的作用(董发勤等, 2005a)。

#### 1.4 自由基与生物活性的关系

自由基所产生的氧化损伤被认为是颗粒物产生生物活性的重要机制之一。Salvador 等(2009)指出活性氧自由基能对蛋白质、脂类、DNA 造成损伤,能够导致心血管疾病、癌症、糖尿病、风湿性关节炎、帕金森等疾病。国外主要研究 PM 和石英粉尘细胞毒性与自由基的因果关系,Upadhyay 等(2003)研究认为颗粒物引发 DNA 损伤与自由基呈正相关关系;Kleinmar(2003)等研究了环境中的粗颗粒物对巨噬细胞功能抑制作用,发现粉尘刺激巨噬细胞产生的超氧阴离子自由基与粉尘剂量正相关。

刘正亮等(2004)研究表明固井水泥粉尘作业工人体内氧自由基反应加剧,氧化-抗氧化状态严重失衡。米生权等(2005a)、赵晓红等(2005)研究发现  $PM_{10}$  能诱导人胚肺成纤维细胞产生超氧阴离子和羟自由基,且超氧自由基生成量随  $PM_{10}$  作用 RAW264.7 细胞时间的延长而增加。 $PM_{2.5}$  表现出比  $PM_{10}$  更强的自由基效应( $P < 0.05$ ),认为氧自由基的氧化损伤可能是大气颗粒物  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  毒性机制所致。

## 2 IMG-微生物相互作用效果研究

国内外 IP 与微生物相互作用毒性效应研究很少,多是尘

载微生物的污染调查。Becker(2002)等研究 IP 对微生物组分具有诱导活性与参与作用以及微生物产物对 IP 粒度的选择引发细胞因子变异。笔者等对大气自然降尘与单株人体正常菌的体外相互作用(代群威等, 2007)及硅酸盐细菌与硅灰石相互作用效果做了研究(代群威等, 2006),结果表明:各种大气尘粒所含化学成分不同,与细菌作用后离子溶出量也不完全相同,粉尘颗粒越小,越易与菌体结合,硅灰石对硅酸盐细菌生长有显著的影响作用,硅酸盐细菌对硅灰石中 Si 等元素有明显增溶作用。

目前还未见有关 IMG-微生物体系界面作用过程中微生物行为对 IMG 特性影响研究,但矿物-微生物作用体系研究已经比较深入,特别是近年来发展的生物浸矿技术,已经在矿物冶金行业得到了广泛的应用,同时相关机理研究也逐渐深入,涉及微生物-溶液-矿物-气相等多相界面作用(柳建设等, 2006)。已有的研究工作从菌落上以化能自氧型微生物(硝化菌、硫化菌(*Ferrobacillus sufooxidans*),铁化菌(*Gallionella Ferruginea*)研究较为深入,也有硅酸盐细菌对石英、高岭土、伊利石、铝土矿等进行淋滤活化研究,利用硅酸盐细菌对铝土矿脱硅(孙德四等, 2005)及其他矿物学工程领域的研究,也对含硫矿物、含铁矿物的微生物转化,细菌适应性驯化,菌株和矿石相互作用,培养液对矿石的适用性,菌浸过程中的条件控制,微生物活性、耐毒性、界面吸附做了探讨(连宾等, 2005)。

国外超细矿物及其粉尘与细菌作用研究多集中在可溶性金属离子与微生物在细胞水平的吸附、聚集、成核矿化(形成纳米结晶物)区分细菌形成矿物 BIM 型(生物引导矿化)和 BCM 型(生物控制矿化)(Dennis, 2004),洋底纳米( $< 500$  nm)铁、锰菌成结核(铁硅酸盐和铁氧化物)作用(Fortin *et al.*, 1998),金属离子/细胞壁/硅酸盐阳离子控制成核作用,细菌表面容易键合溶解离子化物质引导各种矿物成核作用(氧化物、硅酸盐、硫化物)(Etzal *et al.*, 2007),细菌寄生、矿物表面状况与寄聚关系(Kenneth *et al.*, 2005),细菌、真菌和古菌对硅酸盐溶解的作用(Hutchens *et al.*, 2008),利用细菌表面吸附废水和放射性废水中的金属离子(Hafezl *et al.*, 2002),以及在作用表面生成微细矿物(Burford *et al.*, 2002),生物膜与矿物转化关系(Zegeye *et al.*, 2006)铁矿物等方面的研究上。

## 3 矿物颗粒-微生物的“近尺寸作用”

目前,大家对纳米颗粒物的影响研究主要集中在它本身的毒害作用及其对人体健康的危害。Lingard 等(2005)对大气颗粒物中痕量金属浓度及其在自由基活性中所起的作用进行了研究,并认为颗粒物尺寸与 DNA 损伤程度正相关,王双英等(2007)指出人们对气源性超细颗粒物的暴露水平与心脑血管疾病的发病率和死亡率呈正相关,而毛彩霞等(2008)研究发现,二氧化锰颗粒对 HeLa 细胞 DNA 损伤具有尺度依赖毒性作用,纳米尺度比常规尺度二氧化锰颗粒毒性作用更强烈。

笔者等研究了超细水镁石粉体对大肠杆菌生长过程的影响,发现大肠杆菌产生的丙酮酸促进了粉体的溶解(代群威等,2005)。对矿物微粒与人体宿主菌群的作用研究表明,矿物微粒尺寸与微生物作用强度有明显关系,当硅酸盐矿物微粒直径大于 $10\sim 18\ \mu\text{m}$ 时,在矿物-微生物“干”作用中,微生物主要表现为吸附,如果存在有水的“湿界面”,则在界面附近有矿物的微溶解和微电离,也有微生物的代谢产物变化与络合作用,表现为长时间作用的黏附、浸蚀行为;在水体系中矿物颗粒则主要表现为表面荷电和营养离子,微生物表现为自主生长代谢,溶液中离子、pH 值对微生物产生影响。当硅酸盐矿物颗粒直径小于 $5\sim 1\ \mu\text{m}$ 时,矿物颗粒物的粒度尺寸与微生物菌体尺寸相近,在水体系作用中均表现为双悬浮和聚集双中心,且多以微生物主动聚集中心为主,微生物在生长代谢过程中,除了与大颗粒有上述作用外,还产生与矿物微粒有较长时间的近距离相互作用,如微生物代谢过程中对矿物颗粒物的圆化、粉化、槽蚀等行为以及由此引起的颗粒物表面形态、基团、活性、电荷变化等矿物学响应;矿物颗粒物在界-膜接触过程中对微生物的穿刺、内镶、破壁等行为以及由此引发的菌体形态、酶、代谢产物的变化,对菌体成分和代谢物质毒性、对菌体成分产生的免疫损伤等生理学上的响应;微生物代谢产物对矿物颗粒物的溶蚀行为进一步促使颗粒物中的有害成分刺激菌体造成其荚膜抗吞噬和溶解酶能力的变异,这就是我们强调的“近尺寸作用”。

可吸入矿物颗粒-微生物的“近尺寸作用”会随着颗粒级小于亚微米级或纳米级而变得异常激烈,作用区域更集中在界膜两侧,这时微生物将成为作用主体和中心,纳米表面效应会在溶解、膜黏附、穿膜、膜内作用、胞液作用和代谢产物、酶毒性中表现出来。这是一个没有引起足够重视、潜力诱人的研究内容。

## 4 结论

国内外已经对 IP 和 IMG 做了大量的研究,但对大气矿物颗粒物环境行为则研究偏少,对微生物及其与 IMG 的复合颗粒物毒性研究不够。有关 IMG-微生物体系中,微生物本身的直接侵蚀作用和代谢产物有机酸、多糖、氨基酸等对粉尘颗粒表面的溶蚀行为、对颗粒物表面形态、表面电性、表面基团及自由基等的影响,以及由此引起的颗粒物活性和生物毒性的变化等涉及不多。对毒性的研究工作没有纳入矿物颗粒物自身的特性如形态、表面结构、相组成与结晶度等及其吸附成分的复杂性,如附生菌。另外在天然尘源相关研究中对小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物重视不够。

今后,对 IMG 的研究重点大致包括以下几个方面:

(1) 粒度分布、物相构成(XRD)、自由基分布特征,结晶度与形貌特征、矿物组成及特征,微量重金属、有机污染物含量及赋存状态,有机与无机污染物间的复合效应,表面吸附气液相物质的比例和成分变化分析,以及痕量污染物与矿物质

相互作用。

(2) 表面电性、持久性、溶解性等生物-颗粒表面物理化学性质及团聚性、分散性(微量化学元素)相特征、吸附特性与其结晶度、成因、粒度等因素的关系研究,吸附与颗粒物活性自由基、液相释放自由基( $\text{SiO}\cdot$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{HO}\cdot$ 等)的变化研究。

(3) 研究 IMG-微生物-水三元主体作用体系中微生物的溶蚀行为对矿物颗粒物本身表面造成破坏是否会诱导释放更多  $\text{SiO}\cdot$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{HO}\cdot$ 等自由基,同时 IMG 颗粒物刺激微生物菌体代谢过程中是否会产生更多  $\text{O}_2^-$ 、 $\text{HO}\cdot$ 自由基及是否会产生新的自由基。

(4) IMG 的微生物活性特征表达与影响因素研究及其对微生物氧化损伤、Amest 等致突变性的体外微生物效应研究和对微生物的细胞膜结构和核物质代谢的影响研究,进而探讨其对微生物生长抑制及对正常菌群微生态平衡的影响。

## References

- Borm P J. 2002. Particle toxicology: from coal mining to nanotechnology [J]. *Inhal Toxicol.*, 14(3): 311~324.
- Briede J J, De Kromm, Hogervorst J G F, et al. 2005. Development and application of an electron spin resonance spectrometry method for the determination of oxygen free radical formation by particulate matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 39(21): 8420~8426.
- Becker S, Fenton M J and Soukup J M. 2002. Involvement of microbial components and toll-like receptors 2 and 4 in cytokine responses to air pollution particles [J]. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 27(5): 611~618.
- Burford E P, Hillier S and Gadd C M. 2002. Rock and mould transformation of carbonate minerals by fungi [R]. *Mineralogy for the new millennium programme with abstracts*, 173.
- Cao Qiang, Qian Xiaolin, Zhang Shu, et al. 2008. Cytotoxicity of soluble and insoluble components of atmospheric fine particles [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(6): 1167~1173 (in Chinese).
- Dagher Z, Garcon G, Billet S, et al. 2006. Activation of different pathways of apoptosis by air pollution particulate matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ) in human epithelial lung cells (L132) in culture [J]. *Toxicology*, 225(1): 12~24.
- Dai Qunwei, Dong Faqin and Deng Jianjun. 2005. Effect of growth progress of ultrafine brucite powders on *Escherichia coli* [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(3): 137~140 (in Chinese).
- Dai Qunwei, Dong Faqin and Deng Jianjun. 2006. Study on the reciprocity effect between wollastonite and a strain silicate bacterium [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(3): 26~30 (in Chinese).
- Dai Qunwei, Dong Faqin and Deng Jianjun. 2007. Study on the reciprocity between atmosphere natural dropping dusts and single strain in human body surface normal bacteria in vitro [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(4): 699~703 (in Chinese).
- Deng Furong, Guo Xinbiao and Hu Jing. 2009. Acute heart toxicity in rats induced by  $\text{PM}_{2.5}$  intratracheal instillation and its mechanisms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 4(1): 57~62 (in Chinese).

- Deng W J, Louie P K K, Liu W K, *et al.* 2006. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM<sub>2.5</sub> at an electronic waste recycling site in southeast China[ J ]. *Atmospheric Environment*, 40( 36 ): 6 945~6 955.
- Dennis A. 2004. Biom mineralization By Prokaryotes : Rocks as Microbial Fossil[ R ]. Denver Geological Society of America Abstracts with Programs, 36( 5 ): 473.
- Dong Faqin and He Xiaochun. 2005a. Superfine Mineral Dust and Human Health[ J ]. *Journal of Environment and Health*, 22( 5 ): 393~396( in Chinese ).
- Dong Faqin, He Xiaochun and Li Guowu. 2005b. Study on the basic characteristics of several atmospheric dusts in the north China[ J ]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25( 3 ): 114~117( in Chinese ).
- Etzel K, Huber H, Rachel R, Schmalz, *et al.* 2007. Pyrite surface alteration of synthetic single crystals as effect of microbial activity and crystallographic orientation[ J ]. *Advanced Materials Research*, 20~21 : 350~353.
- Feng J L, Chan C K, Fang M, *et al.* 2006. Characteristics of organic matter in PM<sub>2.5</sub> in Shanghai[ J ]. *Chemosphere*, 64( 8 ): 1 393~1 400.
- Fortin D, Ferris F, Gand Scott S D. 1998. Formation of Fe-silicates and Fe-oxides on bacterial surfaces in hydrothermal deposits collected near the Southern Explorer Ridge in the Northeast Pacific Ocean [ J ]. *Mineralogist*. 83 : 1 399~1 408.
- Guo Tao, Ma Yongliang and He Kebin. 2009. Study on spatial distributions of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> in regional atmospheric environment[ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 3( 1 ): 147~150( in Chinese ).
- Guo X B, Huang X L and Jin Y. 2006. Effects of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> collected during the dust storm period on the phagocytic function and cytokine secretion of rat alveolar macrophages[ J ]. *Toxicology Letters*, 164 : S181~181.
- Hafez M B, Ibrahim M Kh, Abdel-Razek A S, *et al.* 2002. Biosorption of some ions on different bacterial species from aqueous and radioactive waste solutions[ J ]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 252( 1 ): 179~185.
- Ho K F, Cao J J, Lee S C, *et al.* 2006. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in urban area of Hong Kong[ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 138( 1 ): 73~85.
- Hutchens E, McDermott F P and Clipson N. 2008. Bacteria, fungi and archaea on silicate minerals—A case for selective colonization[ J ]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 72( 12 ): 404~404.
- Kenneth M, Kemner, Edward J, *et al.* 2005. Synchrotron X-ray Investigations of Mineral-Microbe-Metal Interactions[ J ]. *Mineralogical Society of America*, 1( 4 ): 217~221.
- Kleinman M T, Hamada A, Meacher D, *et al.* 2005. Inhalation of concentrated ambient particulate matter near a heavily trafficked road stimulates antigen-induced airway responses in mice[ J ]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55( 9 ): 1 277~1 288.
- Kleinman M T, Sioutas C, Chang M C, *et al.* 2003. Ambient fine and coarse particle suppression of alveolar macrophage functions[ J ]. *Toxicology Letters*, 137( 3 ): 151~158.
- Lian Bin, Chen Jun, Fu Pingqiu, *et al.* 2005. Weathering of silicate minerals by microorganisms in culture experiments[ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 11( 2 ): 181~186( in Chinese ).
- Lingard J J N, Tomlin A S, Clarke A G, *et al.* 2005. A study of trace metal concentration of urban airborne particulate matter and its role in free radical activity as measured by plasmid strand break assay [ J ]. *Atmospheric Environment*, 39( 13 ): 2 377~2 384.
- Liu Jianshe, Wang Zhaohui, Gen Meimei, *et al.* 2006. Progress in the Study of Polyphase Interfacial Interactions between Microorganism and Mineral in Bio-hydrometallurgy[ J ]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 26( 1 ): 40~44( in Chinese ).
- Liu Zhengliang, Wang Rui, Zhang Hong, *et al.* 2004. Effects of fixed well cement dust on antioxidant in the exposed workers[ J ]. *Chinese Occupational Medicine*, 31( 6 ): 35~36( in Chinese ).
- Mao Caixia, Yang Guangtao, Qiao Yongkang, *et al.* 2008. Size-dependent toxicity of dioxide manganese particles on DNA damage in hela cells[ J ]. *Asian Journal of Ecotoxicology*. 3( 5 ): 438~442( in Chinese ).
- Mi Shengquan and Zhao Xiaohong. 2005a. Toxic mechanism of atmospheric particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in RAW264.7 cells[ J ]. *Journal of Health Toxicology*, 19( 3 ): 317( in Chinese ).
- Mi Shengquan, Zhao Xiaohong, Tao Yan, *et al.* 2005b. Exploring urban inhalable particle matter PM<sub>10</sub> on mechanisms of cell toxicity to HLF cells[ J ]. *Journal of Labour Medicine*, 22( 5 ): 417~419( in Chinese ).
- Rattigan O V, Hogrefe O, Felton H D, *et al.* 2006. Multi-year urban and rural semi-continuous PM<sub>2.5</sub> sulfate and nitrate measurements in New York state : Evaluation and comparison with filter based measurements[ J ]. *Atmospheric Environment*, 40 : S192~S205.
- Salvador M, Angel O and José M E. 2009. Oxidative stress in environmental-induced carcinogenesis[ J ]. *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 674( 1~2 ): 36~44.
- Shao Longyi, Li Weijun, Yang Shushen, *et al.* 2007. Analysis of the mineral composition of dust particles of Beijing extraordinary dust devil in spring of 2002[ J ]. *Science in China( Series D :Earth Sciences )*, 37( 2 ): 215~221( in Chinese ).
- Sheesley R J, Schauer J J, Hemming J D, *et al.* 2005. Seasonal and spatial relationship of chemistry and toxicity in atmospheric particulate matter using aquatic bioassays[ J ]. *Environmental Science and Technology*, 39( 4 ): 999~1 010.
- Song Y, Xu D D, Chai Z F, *et al.* 2006. INAA study for characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Beijing and influence of dust storm[ J ]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 270( 1 ): 29~33.
- Sun Desi and Zhang Qiang. 2005. Research on growth of silicate bacteria and their leaching and dissolution of silicon and aluminium in silicate mineral[ J ]. *Metal Mine*, 9 : 38~40( in Chinese ).
- Sun Junling, Liu Dameng and Yang Xue. 2009. Atmospheric particle pollution and its factors in Beijing[ J ]. *Resources and Industries*, 11( 1 ): 96~100( in Chinese ).

- Tasic M, Duric-Stanojevic B, Rajsic S, *et al.* 2006. Physico-chemical characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Belgrade urban area [J]. *Acta Chimica Slovenica*, 53(3): 401~405.
- Upadhyay D, Panduri V, Ghio, A. *et al.* 2003. Particulate matter induces alveolar epithelial cell DNA damage and apoptosis: role of free radicals and the mitochondria [J]. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 29(2): 180~187.
- Wang Shuangying, Ying Xingqiu and Zhu Xinqiang. 2007. Progress in the study of nano-particle effects on the cardiovascular system [J]. *Foreign Medical Sciences (Section Hygiene)*, 34(2): 65~70 (in Chinese).
- Wang X H, Bi X H, Sheng G Y, *et al.* 2006a. Chemical composition and sources of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Guangzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1~3): 425~439.
- Wang X H, Bi X H, Sheng G Y, *et al.* 2006b. Hospital indoor PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> and associated trace elements in Guangzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 366(1): 124~135.
- Wei A L and Meng Z Q. 2006. Evaluation of micronucleus induction of sand dust storm fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in human blood lymphocytes [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 22(3): 292~297.
- Zegeye A, Mustin C, Ruby C, *et al.* 2006. Factor controlling the biomineralization pathway of c-FeOOH into green rust versus magnetite [R]. *General Meeting of the International Mineralogical Association*, 19: 23~28.
- Zhang Huashan, Yang Danfeng, Yang Hui, *et al.* 2008. Effect on conception and offspring development in female prenatal rats following intratracheal instillation of nano-C/ZnO and C/ZnO composite nanoparticle [J]. *Journal of Hygiene Research*, 37(6): 654~656 (in Chinese).
- Zhang Qianghua, Shi Yingying, Li Dong, *et al.* 2008. Micro-morphology character of PM<sub>10</sub> and its mineral composition in Nanjing typical areas [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2(4): 527~531 (in Chinese).
- Zhao Xiaohong, Mi Shengquan and Hao Yunjie. 2005. Reactive Oxygen Radicals Generation and Apoptosis in HLF Cells Induced by PM<sub>10</sub> [J]. *Journal of Environment and Health*, 22(6): 427~430 (in Chinese).
- 溶成分的细胞毒性 [J]. *环境科学学报*, 28(6): 1167~1172.
- 代群威, 董发勤, 邓建军. 2005. 超细水镁石粉体对大肠杆菌生长过程的影响 [J]. *矿物岩石*, 25(3): 137~140.
- 代群威, 董发勤, 邓建军. 2006. 硅酸盐细菌与硅灰石相互作用效果研究 [J]. *矿物岩石*, 26(3): 26~30.
- 代群威, 董发勤, 邓建军. 2007. 大气自然降尘与单株人体正常菌的体外相互作用研究 [J]. *环境科学学报*, 27(4): 699~703.
- 邓芙蓉, 郭新彪, 胡婧. 2009. 气管滴注大气细颗粒物对大鼠心脏的急性毒性及其机制研究 [J]. *生态毒理学报*, 4(1): 57~62.
- 董发勤, 贺小春. 2005a. 超细矿物粉尘与人体健康 [J]. *环境与健康杂志*, 2(5): 393~396.
- 董发勤, 贺小春, 李国武. 2005b. 我国北方部分地区大气粉尘的特征研究 [J]. *矿物岩石*, 25(3): 114~117.
- 郭涛, 马永亮, 贺克斌. 2009. 区域大气环境中 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 空间分布研究 [J]. *环境工程学报*, 3(1): 147~150.
- 连宾, 陈骏, 傅平秋等. 2005. 微生物影响硅酸盐矿物风化作用的模拟试验 [J]. *高校地质学报*, 11(2): 181~186.
- 刘正亮, 王瑞, 张宏, 等. 2004. 固井水泥粉尘对接触工人抗氧化酶的影响 [J]. *中国职业医学*, 31(6): 35~36.
- 柳建设, 王兆慧, 耿梅梅, 等. 2006. 微生物浸出中微生物~矿物多相界面作用的研究进展 [J]. *矿冶工程*, 26(1): 40~44.
- 毛彩霞, 杨光涛, 乔永康, 等. 2008. 二氧化锰颗粒对Hela细胞DNA损伤的尺度依赖性毒作用 [J]. *生态毒理学报*, 3(5): 438~442.
- 米生权, 赵晓红. 2005a. 大气颗粒物 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 的 RAW264.7 细胞毒性机制 [J]. *毒理学杂志*, 19(3): 317.
- 米生权, 赵晓红, 陶燕, 等. 2005b. 城市大气 PM<sub>10</sub> 对 HLF 细胞增殖和细胞周期与凋亡及细胞内钙离子浓度的影响 [J]. *环境与职业医学*, 22(5): 417~419.
- 邵龙义, 李卫军, 杨书申, 等. 2007. 2002年春季北京特大沙尘暴颗粒的矿物组成分析 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 37(2): 215~221.
- 孙德四, 张强. 2005. 硅酸盐细菌生长及对硅酸盐矿物中硅铝的浸溶 [J]. *金属矿山*, 9: 38~40.
- 孙俊玲, 刘大锰, 杨雪. 2009. 北京市海淀区大气颗粒物污染水平及其影响因素 [J]. *资源与产业*, 11(1): 96~100.
- 王双英, 应杏秋, 朱心强. 2007. 纳米颗粒物对心血管系统影响的研究进展 [J]. *国外医学(卫生学分册)*, 34(2): 65~70.
- 张华山, 杨丹凤, 杨辉等. 2008. 纳米颗粒物对大鼠妊娠结局及其子代近期记忆的影响 [J]. *卫生研究*, 37(6): 654~656.
- 张强华, 石莹莹, 李东, 等. 2008. 南京市典型地区可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 中颗粒的微观形貌特征及其矿物组成 [J]. *环境工程学报*, 2(4): 527~531.
- 赵晓红, 米生权, 郝云捷. 2005. PM<sub>10</sub> 诱导人胚肺成纤维细胞自由基产生与其凋亡的作用 [J]. *环境与健康杂志*, 2(6): 427~430.

#### 附中文参考文献

曹强, 钱孝琳, 宋伟民, 等. 2008. 大气细颗粒物水溶成分和非水