

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 ..... 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子浓度特征分析 ..... 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 ..... 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 ..... 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 ..... 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 ..... 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 ..... 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 ..... 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 ..... 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 ..... 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 ..... 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 ..... 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 ..... 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 ..... 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 ..... 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 ..... 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴昉,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 ..... 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 ..... 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 ..... 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 ..... 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 ..... 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 ..... 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 ..... 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 ..... 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 ..... 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 ..... 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 ..... 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 ..... 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 ..... 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 ..... 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 ..... 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 ..... 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 ..... 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 ..... 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 ..... 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 ..... 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 ..... 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 ..... 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 ..... 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 ..... 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 ..... 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 ..... 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 ..... 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 ..... 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 ..... 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 ..... 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 ..... 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 ..... 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 ..... 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 ..... 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 ..... 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 ..... 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的脱除性能 ..... 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 ..... 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 ..... 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 ..... 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 ..... 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

# 唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究

苗红妍<sup>1</sup>, 温天雪<sup>1</sup>, 王丽<sup>1,2</sup>, 李杏茹<sup>3</sup>, 王跃思<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学化学与工程学院, 北京 100029; 3. 首都师范大学化学系, 北京 100048)

**摘要:** 为认知唐山大气颗粒物中典型二次污染化学成分水溶性无机盐的浓度水平、季节变化和粒径分布特征, 于2010年9月~2011年8月使用惯性撞击式分级采样器对唐山大气颗粒物进行了分级采样, 并用离子色谱分析了其中水溶性无机盐含量。结果表明, PM<sub>10</sub> (可视吸入颗粒物) 和 PM<sub>2.5</sub> (细粒子) 中以3种水溶性无机盐 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 为主, 三者之和分别占 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机盐总浓度的68%和77%; PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中3种盐的浓度和在春、夏、秋、冬这4个季节分别为35.0、84.7、67.3、61.6 μg·m<sup>-3</sup>和23.2、64.8、52.7、49.6 μg·m<sup>-3</sup>, 颗粒物中3种盐在细粒子中的赋存比例年均值分别为70%、75%和94%, 夏季赋存于粗粒子中的比例显著高于其它季节。Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 全年均呈粗模态单峰分布。唐山大气颗粒物污染严重, 控制燃煤、机动车尾气和生物质燃烧直排颗粒物的同时, 要重点加强对气态污染物排放的控制, 同时要控制地面扬尘和建筑灰尘。全面控制人为污染排放源, 同时加强绿化和地面硬化、封闭式管理建筑工地, 才有可能抑制住唐山市目前严重的大气污染。

**关键词:** 分级采样; 水溶性无机盐; 季节变化特征; 粒径分布; 来源分析; 唐山

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1225-07

## Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan

MIAO Hong-yan<sup>1</sup>, WEN Tian-xue<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, LI Xing-ru<sup>3</sup>, WANG Yue-si<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Chemical and the Engineering College, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** To investigate the levels, seasonal variation and size distributions of water soluble inorganic components, samples were collected with an Andersen cascade sampler in Tangshan from Sep. 2010 to Aug. 2011, and were analyzed by IC. The results showed that the secondary inorganic components (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) were the major contributors to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, accounting for 68% and 77% of the total water soluble salts in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, respectively. The total concentrations of these three ions in spring, summer, autumn, and winter were 35.0, 84.7, 67.3 and 61.6 μg·m<sup>-3</sup> in PM<sub>10</sub>, and 23.2, 64.8, 52.7 and 49.6 μg·m<sup>-3</sup> in PM<sub>2.5</sub>. About 70%, 75% and 94% of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> were found in the fine mode of aerosol, respectively. Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> were unimodal and mostly concentrated in the coarse mode. Those results indicated that the pollution caused by atmospheric particles is serious in Tangshan. It is urgent to control the anthropogenic emissions sources, such as vehicle emission, coal and biomass burning. Meanwhile, it is necessary to strengthen the greening and reinforce the management of the road construction.

**Key words:** cascade sample; water-soluble inorganic salt; seasonal variation; size distribution; source; Tangshan

近年来,随着我国经济快速发展,大气颗粒物已经成为众多城市的首要污染物。水溶性无机盐作为大气颗粒物的重要组成部分,直接影响降水酸度和大气能见度<sup>[1-3]</sup>,并通过干扰地气系统能量平衡而影响全球气候变化。不同粒径的颗粒物中水溶性无机盐的组成和含量显著不同,对其粒径分布特征的研究有助于了解颗粒物、尤其是细粒子的形成机制,有助于追踪气态前体物的最初排放源,服务于控制措施的制定。近年来,国内关于大气颗粒物中水溶性无机盐的研究主要集中在珠三角<sup>[4-6]</sup>和长三角地区<sup>[7-9]</sup>,以及北京<sup>[10-12]</sup>、天津<sup>[13]</sup>等大城市,并且研究内容多关注 PM<sub>10</sub> (可吸入颗粒物,空气动力学直径小于或等于 10 μm 的颗粒物) 和 PM<sub>2.5</sub> (细粒

子,空气动力学直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物),而关于大气颗粒物分级研究鲜有报导。

唐山市地处环渤海湾中心地带,南临渤海,北依燕山。近年来,随着城市化进程加快,钢铁、煤矿、陶瓷等重污染企业日益增多;机动车保有量迅速增加,截止2011年12月已拥有机动车150万辆,随之带来的空气质量问题也日益突出。唐山大气中 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的浓度高于周边地区<sup>[14]</sup>,交通和工业排放是

收稿日期: 2012-07-25; 修订日期: 2012-09-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100100); 环境保护公益性行业科研专项(201009001); 国家自然科学基金重点项目(41230642)

作者简介: 苗红妍(1985~),女,博士研究生,主要研究方向为大气化学与大气环境, E-mail: mhy@dq.cern.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

大气中挥发性有机物的主要来源<sup>[15]</sup>,但是目前关于大气颗粒物中水溶性无机盐的研究还鲜见报道. 唐山作为华北区域工业重镇之一,研究其大气颗粒物中水溶性无机盐的特点对于进一步了解华北地区气溶胶物理化学特征有重要的作用. 本研究于2010年9月~2011年8月对唐山大气颗粒物进行了分级采样,测定分析了颗粒物中水溶性无机盐的浓度水平、季节变化和粒径分布特征,并探讨了其主要来源,以期对唐山大气颗粒物污染防治工作提供部分科学依据.

## 1 材料与方法

采样地点位于唐山市市中心的河北联合大学(118.16°E,39.62°N),周边以商业区为主,向北紧邻唐山市区主要交通干线新华西道,向东1km为主干道建设南路,采样点如图1所示. 使用安德森撞击式分级采样器(Andersen 20-800)采集唐山市大气颗粒物,流速为28.3 L·min<sup>-1</sup>,9级粒径范围依次为:<0.43、0.43~0.65、0.65~1.1、1.1~2.1、2.1~3.3、3.3~4.7、4.7~5.8、5.8~9和>9 μm. 从2010年9月~2011年8月,每2周采样1次,每次从当日10:00开始,连续采集24 h. 采样使用混合纤维素酯膜,采集后的膜样品置于冰箱内冷冻避光保存至分析(4周内),共采集有效样品24组.

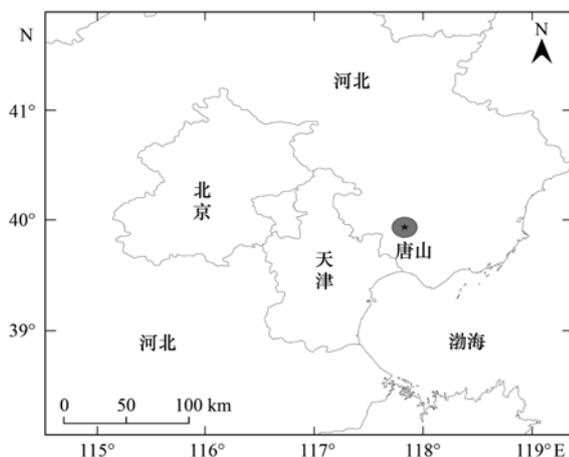


图1 采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling station

取1/2张膜置于PET瓶中,加入40 mL去离子水,恒温超声提取30 min,经0.45 μm滤膜过滤后用ICS-90离子色谱测定其中阳离子Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和阴离子Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的含量. 阳离子检测采用Ionpac CS12A 4×250 mm色谱柱,CSRS 300-4 mm抑制器,淋洗液为22 mmol·L<sup>-1</sup>的MSA;阴离子检测采用Ionpac AS14A 4×250 mm分离柱,ASRS 300-4 mm抑制器,淋洗液为3.5 mmol·L<sup>-1</sup>的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和1 mmol·L<sup>-1</sup>的NaHCO<sub>3</sub>混合溶液. 进样量为10 μL(阳离子)和100 μL(阴离子)时,各离子的最低检测限均小于0.2 μg·m<sup>-3</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水溶性无机盐浓度水平

表1给出了采样期间唐山大气颗粒物中主要水溶性无机盐浓度. 作为重工业城市,唐山大气颗粒物污染严重,水溶性无机盐含量较高,以二次转化生成的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>为主. 大气PM<sub>9</sub>(空气动力学直径小于或等于9 μm的颗粒物,可视为可吸入颗粒物PM<sub>10</sub>)中水溶性无机盐总浓度(TWSS)为(91.3±9.5) μg·m<sup>-3</sup>,其中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(S-N-A)的含量分别为23.7、27.5和10.9 μg·m<sup>-3</sup>,三者浓度总和占TWSS的68%;除了3种主要无机盐之外,PM<sub>9</sub>中Ca<sup>2+</sup>和Cl<sup>-</sup>的含量也较高,分别为10.4 μg·m<sup>-3</sup>和9.6 μg·m<sup>-3</sup>,两者浓度总和占TWSS的22%;K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量较低,浓度总和仅占TWSS浓度的10%. 唐山PM<sub>2.1</sub>(空气动力学直径小于或等于2.1 μm的颗粒物,细粒子)中TWSS为(61.9±7.5) μg·m<sup>-3</sup>,其中S-N-A平均浓度分别为17.9、19.4和10.3 μg·m<sup>-3</sup>,三者浓度总和占TWSS的比例上升到77%;除了3种主要无机盐之外,PM<sub>2.1</sub>中Cl<sup>-</sup>的含量较高,为7.4 μg·m<sup>-3</sup>,占TWSS的12%;K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量都较低,浓度总和占TWSS的11%. PM<sub>2.1</sub>中TWSS占PM<sub>9</sub>中TWSS的68%,说明唐山大气颗粒物中水溶性无机盐主要集中在细粒子中. 其中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>在细粒子中的比例高达94%,这与沿海城市香港的观测结果相似<sup>[16]</sup>,说明NH<sub>4</sub><sup>+</sup>绝大部分分布在细粒子中;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、

表1 唐山大气PM<sub>9</sub>和PM<sub>2.1</sub>中水溶性无机盐浓度/μg·m<sup>-3</sup>

Table 1 Concentration of water-soluble inorganic salts in PM<sub>9</sub> and PM<sub>2.1</sub> in Tangshan/μg·m<sup>-3</sup>

项目	总和	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
PM <sub>9</sub>	91.3±9.5	23.7	27.5	10.9	9.6	3.8	3.0	10.4	2.3
PM <sub>2.1</sub>	61.9±7.5	17.9	19.4	10.3	7.4	3.0	1.6	2.0	0.5
PM <sub>2.1</sub> /PM <sub>9</sub>	0.68	0.75	0.70	0.94	0.76	0.78	0.53	0.19	0.21

$\text{NO}_3^-$  及  $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  在细粒子的比例都超过了 70%, 表明这 4 种无机盐也主要分布在细粒子中;  $\text{Na}^+$  在粗、细粒子中的比例各占一半, 分布基本均匀;  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  在粗粒子中的比例均超过了 80%, 说明这两种无机盐主要分布在粗粒子中。

唐山大气颗粒物污染严重,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中仅 8 种主要的水溶性无机盐浓度总和 ( $91.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $61.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 就已经超出了环境质量标准 (GB 3095-2012) 中  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的年均浓度限值 ( $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); 并且唐山大气污染主要集中在细粒子中, 说明应该重点进行细粒子减排. 与周边城市相比, 唐山大气颗粒物中水溶性无机盐含量低于郑州<sup>[17]</sup>、石家庄<sup>[18]</sup>、西安<sup>[19]</sup> 等重工业城市, 与北京<sup>[20]</sup>、天津<sup>[21]</sup> 含量相当, 但远高于承德<sup>[18]</sup> 等旅游城市. 尽管周边天津<sup>[22]</sup>、郑州<sup>[17]</sup> 等地的  $\text{NO}_3^-$  含量都明显低于  $\text{SO}_4^{2-}$ , 可是唐山大气颗粒物中  $\text{NO}_3^-$  的含量已经超过了  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量, 这与北京<sup>[18]</sup> 的观测结果相似, 但唐山大气颗粒物中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度比 (1.3,  $\text{PM}_{2.5}$ ; 1.6,  $\text{PM}_{10}$ ) 已经高于北京 (1.1,  $\text{PM}_{2.5}$ ), 这可能来自两方面原因: 一方面是因为近年来唐山机动车数量大量增加, 移动源的贡献越来越明显, 另一方面是由于“十一五”以来工业脱硫实施良好, 降低了大气颗粒物中  $\text{SO}_2$  的含量, 但是脱氮在部分区域还没有较好的实施, 两方面共同增加了环境中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度比。

## 2.2 水溶性无机盐季节特征

图 2 给出了唐山大气颗粒物中 TWSS 以及各种水溶性无机盐的季节分布. 从中可以看出, 唐山大

气  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中的 TWSS 均为夏季浓度最高, 秋冬季次之, 春季最低, 这与大城市西安<sup>[19]</sup>、北京<sup>[18]</sup>、天津<sup>[18]</sup> 的观测结果略有不同. 水溶性无机盐中含量最高的 S-N-A 与 TWSS 呈现相似的季节变化:  $\text{PM}_{10}$  中三者浓度总和在夏、秋、冬、春这 4 个季节分别为  $84.7$ 、 $67.3$ 、 $61.6$  和  $35.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  中分别为  $64.8$ 、 $52.7$ 、 $49.6$  和  $23.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 大气颗粒物中的 S-N-A 主要来自大气中气态污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  的均相光化学氧化和非均相液相化学过程<sup>[10]</sup>. 唐山夏季温度高、湿度大、光照强,  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的光化学氧化和液相化学过程都明显增强, 采样期间的观测数据显示, 夏季的硫酸化率 ( $\text{SOR} = 0.67$ ) 和氮氧化率 ( $\text{SOR} = 0.35$ ) 显著高于其它季节 ( $\text{SOR} < 0.36$ ,  $\text{NOR} < 0.21$ ); 而  $\text{NH}_3$  夏季挥发性最高, 作为大气中气态硫酸和硝酸最具竞争能力的中和剂, 使气-粒转化过程更容易发生, 进而促使 S-N-A 在夏季达到最大值. 唐山夏季细粒子中 ( $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ )/ $\text{NH}_4^+ \approx 1$  (摩尔比), 说明大气中的  $\text{NH}_4^+$  将  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  完全中和, 主要以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形式存在. 秋季大气相对稳定, 静稳天气多、空气湿度较大, 一则细粒子中水溶性无机盐易于吸湿增长, 二则有助于离子表面的液相化学反应, 使此 3 种无机盐维持在较高的浓度水平; 冬季虽然气粒转化速率降低, 但采暖期化石燃料燃烧增加了污染气体的源排放, 加上较低的大气混合层高度不利于污染物的扩散, S-N-A 的含量仍然很高, 但是与北方其它城市的观测结果不同<sup>[19]</sup>, 唐山冬季  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度并不是全年最高, 一方面是近年来工业燃煤

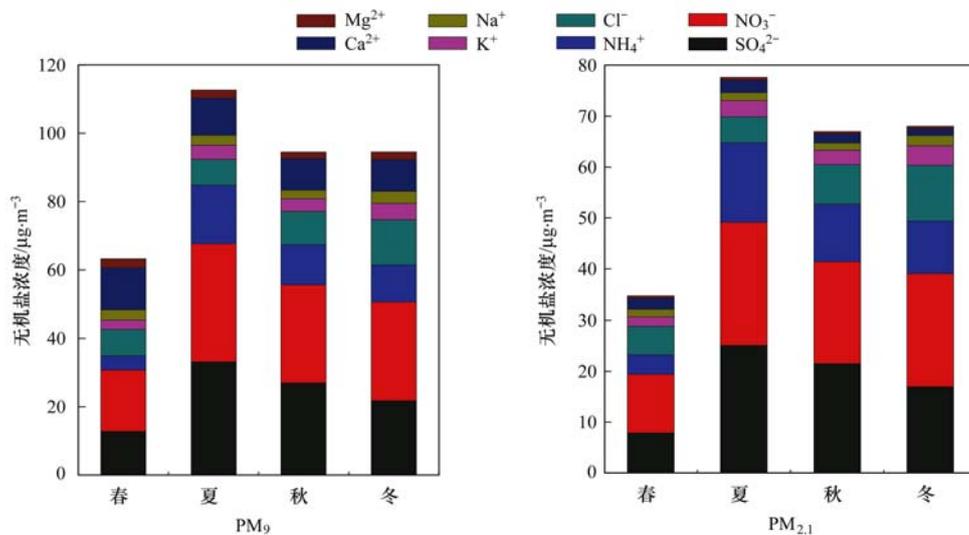


图 2  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.1}$  中水溶性无机盐季节分布

Fig. 2 Seasonal distributions of water soluble inorganic salts in  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.1}$

脱硫,另一方面则是  $\text{SO}_2$  向硫酸盐的转化率很低;春季唐山风速大,西北干洁气团对当地细粒子具有清除作用,所以3种典型无机盐含量显著低于其它季节,但此时粗粒子中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的含量均高于其它季节,春季  $\text{PM}_{10}$  中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的浓度均为含量最低的秋季的1.3倍。

唐山大气颗粒物中  $\text{Cl}^-$  的浓度呈现冬 > 秋 > 春 > 夏的季节变化,冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{Cl}^-$  的浓度高达  $11.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是春季 ( $4.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的2倍,占  $\text{PM}_{10}$  中  $\text{Cl}^-$  的83%。张凯等<sup>[23]</sup>也曾观测到北京冬季大气中  $\text{Cl}^-$  浓度显著高于其它季节的现象,并将其归结为供暖期化石燃料燃烧的影响。与北京不同的是,唐山冬季大气颗粒物中除了高浓度的  $\text{Cl}^-$  之外,  $\text{K}^+$  的浓度也显著高于其它季节,而  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{SO}_2$  并没有达到季节最大值,相关分析显示,唐山细粒子中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{K}^+$  呈极显著相关 ( $R^2 = 0.78, P < 0.01$ ),根据  $\text{KCl}$  是生物质燃烧的典型生成物<sup>[24]</sup>,判断唐山冬季生物质燃烧对大气颗粒物中  $\text{Cl}^-$  贡献较大。而且下文的因子分析也显示,生物质燃烧是唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的主要来源。除了在冬季达到最

大值之外,唐山大气颗粒物中的  $\text{K}^+$  在夏秋季节的浓度略高于春季,说明周边农业区季节性秸秆燃烧对唐山市大气污染具有一定影响。

唐山大气颗粒物中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度季节变化不显著,仅在春夏季略高于其它季节。春季主要表现为两种无机盐在粗粒子中浓度增加明显,推测可能是因为春季西北气团带来的沙尘,以及当地植被还未返青造成土地裸露经大风吹起扬尘所致;而夏季两种无机盐在细粒子中浓度增加,推测可能是因为夏季建筑施工的灰尘所致。

### 2.3 粒径分布

如图3,从各种无机盐全年的粒径分布来看,唐山大气颗粒物中的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  呈现相似的粒径分布,在  $0.43 \sim 1.1 \mu\text{m}$  和  $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$  出现两个明显峰值,细粒径段的峰高和峰宽都略大于粗粒径段;而另一种二次无机盐  $\text{NH}_4^+$  仅在  $0.43 \sim 1.1 \mu\text{m}$  出现一个明显峰值(夏季除外);  $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  也在  $0.43 \sim 1.1 \mu\text{m}$  和  $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$  出现两个峰值,但细粒径段的峰高和峰宽显著大于粗粒径段;  $\text{Na}^+$  在粗细粒径段的峰高和峰宽相似;  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  仅在  $4.7$

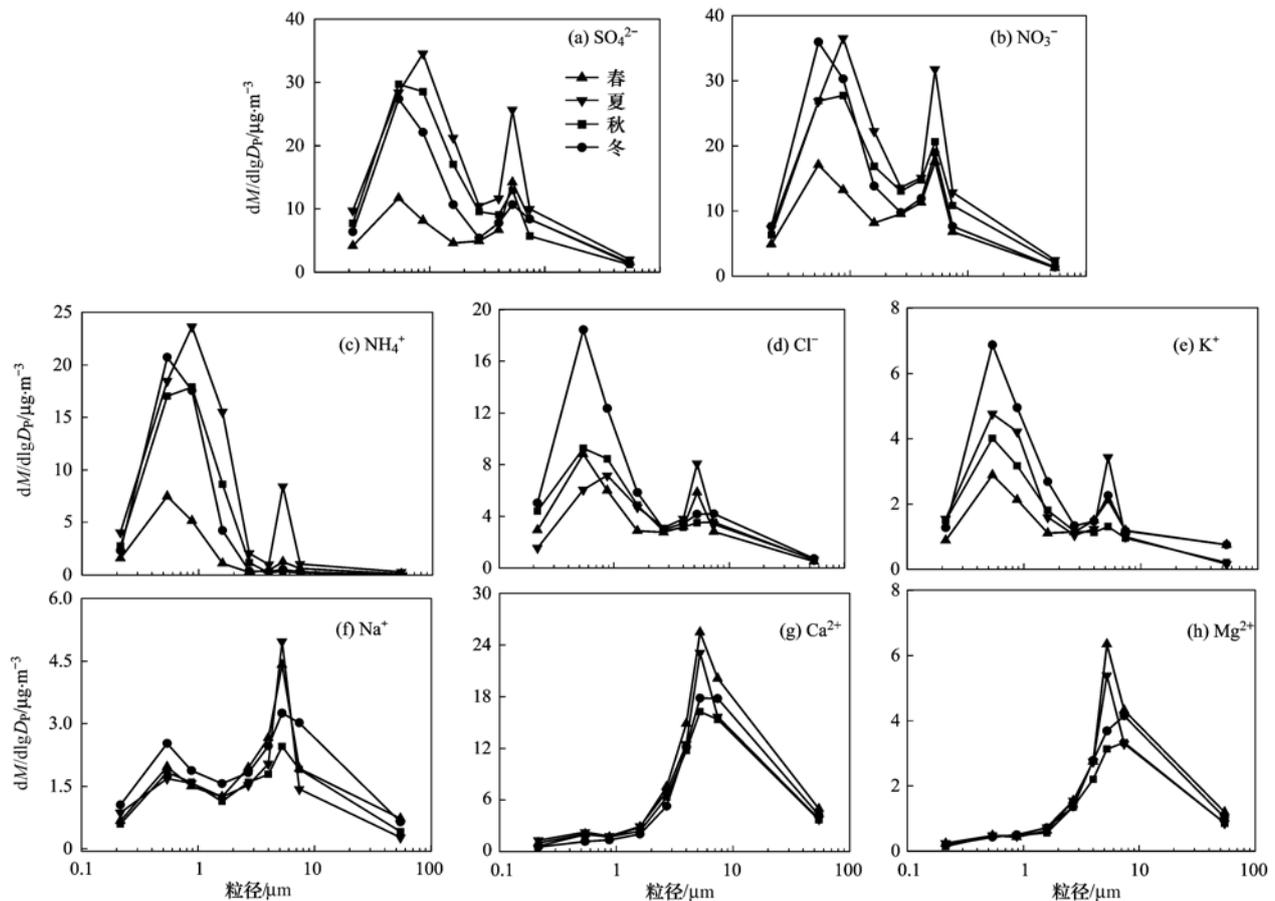


图3 水溶性无机盐粒径分布

Fig. 3 Mass size distributions of water-soluble inorganic salts

~9  $\mu\text{m}$  出现了一个明显峰值。

受气象条件和地理位置的影响,大气颗粒物在不同季节会呈现不同的粒径分布<sup>[3,16,25]</sup>,据此可以判别其来源和形成机制。唐山大气颗粒物中 S-N-A 的粒径分布呈现相似的季节变化趋势。首先,春、冬季节 S-N-A 均在 0.43 ~ 0.65  $\mu\text{m}$  处出现峰值,而夏、秋季节却在 0.65 ~ 1.1  $\mu\text{m}$  处出现峰值,呈现出由凝结模态向液滴模态转移的明显迹象,湿度可能是发生这种转移的主要影响因素。唐山夏、秋季节大气湿度高,气粒转化产生的 S-N-A 吸湿增长或者与非降水的云滴、雾滴结合<sup>[16]</sup>,发生了模态峰值移动。徐宏辉等<sup>[20]</sup>对北京大气颗粒物的观测也发现,在持续高湿度的气象条件下, $\text{SO}_4^{2-}$  也出现了由凝结模态向液滴模态转移的现象。其次,夏季 S-N-A 在 4.7 ~ 9  $\mu\text{m}$  的峰值浓度高于其它季节,说明可能受海盐的影响。Zhuang 等<sup>[26]</sup>曾报道海盐对粗粒子中硝酸盐和硫酸盐的积累和形成起着重要作用,唐山夏季受海上气团影响显著,大气中粗粒径海盐粒子增多,潮湿的粒子表面易于吸收大气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ,进而在液膜中转化,形成 S-N-A<sup>[26]</sup>,表现为在粗粒子中的浓度增加。

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  粒径分布的季节变化趋势相似。在细粒子中, $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  冬季的峰值浓度高于其它季节,结合上文分析,是冬季生物质燃烧增加所致。在粗粒子中, $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  在夏季出现相对较高浓度,这是因为唐山夏季受海上气团影响,大气中海盐粗粒子浓度增加,进而促进了 3 种无机盐在粗粒子中峰值浓度的增加,同样受海盐影响的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  在夏季的粗粒径段也出现了峰值。这说明海盐对唐山夏季粗粒子中的水溶性无机盐的增高具有重要作用。

唐山大气颗粒物中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  全年粒径分布均以粗模态为主,只是春季的峰值浓度略高一些,这

与两种无机盐的季节浓度变化相一致。

## 2.4 来源分析

因子分析表明,  $\text{PM}_{10}$  中 TWSS 主要受 4 个因子的影响,因子 1 的方差贡献率高达 44%,载荷值较大的变量为 S-N-A,分析这 3 种无机盐主要来自气态前体物( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$ )的二次转化,因此因子 1 代表了机动车、燃煤以及工业活动中污染气体对  $\text{PM}_{10}$  中 TWSS 的贡献;因子 2 的方差贡献率为 35%,其中载荷值较大的变量为  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ ,说明因子 2 受建筑和风沙扬尘的影响;因子 3 的方差贡献率为 10%,载荷值较大的变量为  $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$ ,判断因子 3 主要代表生物质燃烧;因子 4 中载荷值较大的变量为  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$ ,结合唐山的地理位置,确定因子 4 为海盐的影响,方差贡献率为 6%;4 个因子总的方差贡献率为 95%,几乎解释了  $\text{PM}_{10}$  中 TWSS 的全部来源。 $\text{PM}_{2.5}$  中 TWSS 主要受 3 个因子的影响,与  $\text{PM}_{10}$  中的前 3 个因子相同,但各因子方差贡献率略有差别。其中因子 1 与  $\text{PM}_{10}$  中的因子 1 相同,代表了污染气体对 TWSS 的贡献,方差贡献率为 43%; $\text{PM}_{2.5}$  中因子 2 代表了生物质燃烧的影响,方差贡献率上升到 27%,显著高于其在  $\text{PM}_{10}$  中的贡献率,说明细粒子受生物质燃烧影响较大;因子 3 代表建筑和风沙扬尘的影响,方差贡献率仅为 17%,远低于其在  $\text{PM}_{2.5}$  中的贡献率,说明细粒子受建筑和风沙扬尘的影响小一些;3 个因子总的方差贡献率为 87%,很好地反映了  $\text{PM}_{2.5}$  中 TWSS 的主要来源。

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐主要受污染气体二次转化、生物质燃烧、扬尘和海盐的影响。其中污染气体二次转化的影响最大,其对应的因子 1 在粗细粒子中的方差贡献率均超过了 40%,表明机动车、燃煤和工业活动中产生的污染气体仍是最大的污染源,当地应加强对气态污染物人为排放的控制。值得关注的是唐山大气中高浓度的细粒子污染

表 2 主成分分析因子载荷

Table 2 Factor loading from principal component analysis

项目	$\text{PM}_{10}$				$\text{PM}_{2.5}$		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3
$\text{SO}_4^{2-}$	0.97	-0.04	0.10	0.03	0.97	0.11	-0.04
$\text{NO}_3^-$	0.92	-0.06	0.29	0.05	0.90	0.34	0.00
$\text{NH}_4^+$	0.98	-0.13	0.11	0.01	0.98	0.12	-0.10
$\text{Cl}^-$	0.27	0.11	0.79	0.49	0.25	0.84	-0.02
$\text{K}^+$	0.22	0.31	0.90	0.09	0.22	0.91	0.16
$\text{Na}^+$	0.01	0.34	0.26	0.89	-0.04	0.32	0.12
$\text{Ca}^{2+}$	-0.05	0.93	0.15	0.22	-0.07	-0.08	0.95
$\text{Mg}^{2+}$	-0.16	0.93	0.19	0.14	-0.04	0.24	0.88
方差贡献/%	44	35	10	6	43	27	17

接近 1/3 来自生物质燃烧,而国内其它城市,如上海<sup>[27]</sup>、青岛<sup>[28]</sup>、成都<sup>[29]</sup>和平顶山<sup>[30]</sup>几乎不受生物质燃烧的影响;因此要加强对秸秆等生物质燃烧的影响,尤其是在冬季取暖期以及夏秋季节.唐山粗粒子受建筑和风沙扬尘影响较大,建议加强绿化和地面硬化,尤其对建筑工地实施封闭式管理.唐山虽然属于海滨城市,但海盐对大气颗粒物的贡献并不显著,这与滨海城市天津<sup>[21]</sup>、厦门<sup>[31]</sup>的观测结果相似,但结合上文分析,海盐的强吸湿性对大气细粒子粒径增长和对非均相化学过程的催化作用不可小觑.

### 3 结论

(1)唐山大气颗粒物污染严重,颗粒物中水溶性无机盐以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  为主,三者之和在  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中分别占水溶性无机盐总浓度的 68% 和 77%.唐山地区二次细粒子污染严重.

(2)受高温、高湿和太阳辐射影响,颗粒物中二次转化生成的水溶性无机盐在夏季的浓度显著高于其它季节,并存在由凝结模态向液滴模态转移的明显迹象;夏季粗粒子中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  浓度的显著增加与非均相化学过程有关.

(3)冬季生物质燃烧一次污染排放严重,颗粒物中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  在细粒子中的峰值显著高于其它季节;  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  四季均呈粗模态单峰分布.

(4)为抑制唐山目前严重的大气颗粒物污染,应加强对人为化石燃料燃烧排放  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的管制,尤其是冬季化石燃料燃烧细粒子的直排;同时加强对生物质燃烧排放的管理,加强绿化和地面硬化,尤其对建筑工地实施必要的封闭式管理.

致谢:感谢河北联合大学封孝信老师对采样工作的帮助.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Pathak R K, Yao X H, Lau A K H, *et al.* Acidity and concentrations of ionic species of  $\text{PM}_{2.5}$  in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(8): 1113-1124.
- [ 2 ] Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, *et al.* Chemical characteristics of fine particles ( $\text{PM}_{10}$ ) from Xi'an, China [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2010, **44**(6): 461-472.
- [ 3 ] 耿彦红, 刘卫, 单健, 等. 上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1585-1589.
- [ 4 ] Hu M, Wu Z J, Slanina J, *et al.* Acidic gases, ammonia and water-soluble ions in  $\text{PM}_{2.5}$  at a coastal site in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6310-6320.
- [ 5 ] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [ 6 ] Zhang F W, Xu L L, Chen J S, *et al.* Chemical compositions and extinction coefficients of  $\text{PM}_{2.5}$  in peri-urban of Xiamen, China, during June 2009-May 2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **106**: 150-158.
- [ 7 ] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of  $\text{PM}_{2.5}$  and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [ 8 ] Wang G H, Huang L M, Gao S X, *et al.* Characterization of water-soluble species of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  aerosols in urban area in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(8): 1299-1307.
- [ 9 ] Xiu G L, Zhang D, Chen J Z, *et al.* Characterization of major water-soluble inorganic ions in size-fractionated particulate matters in Shanghai campus ambient air [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(2): 227-236.
- [ 10 ] Kai Z, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Properties of nitrate, sulfate and ammonium in typical polluted atmospheric aerosols ( $\text{PM}_{10}$ ) in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(1): 67-77.
- [ 11 ] He K, Yang F, Ma Y, *et al.* The characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [ 12 ] Wang Y, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6579-6591.
- [ 13 ] Gu J X, Bai Z P, Li W F, *et al.* Chemical composition of  $\text{PM}_{2.5}$  during winter in Tianjin, China [J]. *China Particology*, 2011, **9**(3): 215-221.
- [ 14 ] 王晓元, 辛金元, 王跃思, 等. 唐山夏秋季大气质量观测与分析 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 877-885.
- [ 15 ] 孙杰, 王跃思, 吴方堃, 等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [ 16 ] Zhuang H, Chan C K, Fang M, *et al.* Size distributions of particulate sulfate, nitrate, and ammonium at a coastal site in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(6): 843-853.
- [ 17 ] 路新燕. 郑州市空气颗粒物污染状况调查及研究 [D]. 河南: 郑州大学, 2010.
- [ 18 ] 赵普生, 张小玲, 孟伟, 等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- [ 19 ] 韩月梅, 沈振兴, 曹军骥, 等. 西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征 [J]. *环境化学*, 2009, **28**(2): 261-266.
- [ 20 ] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 14-19.
- [ 21 ] 李伟芳, 白志鹏, 魏静东, 等. 天津冬季大气中  $\text{PM}_{2.5}$  及其主

- 要组分的污染特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(6): 481-486.
- [22] 姚青, 孙枚玲, 张长春, 等. 天津大气气溶胶化学组分的粒径分布和垂直分布[J]. 气象科技, 2008, **35**(6): 692-696.
- [23] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气 PM<sub>10</sub> 中水溶性氯盐的观测研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 825-830.
- [24] 刘成德, 李玉武, 董树屏, 等. 生物质燃烧颗粒物的定量分析和化学形态[J]. 环境化学, 2002, **21**(3): 209-217.
- [25] Hu M, He L Y, Zhang Y H, *et al.* Seasonal variation of ionic species in fine particles at Qingdao, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(38): 5853-5859.
- [26] Zhuang H, Chan C K, Fang M, *et al.* Formation of nitrate and non-sea-salt sulfate on coarse particles [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(26): 4223-4233.
- [27] 陈明华, 陈静森, 李德. 上海市大气颗粒物高浓度区污染物的源解析[J]. 上海环境科学, 1997, **16**(10): 15-17.
- [28] 刘咸德, 封跃鹏, 贾红, 等. 青岛市大气颗粒物来源的定量解析——化学质量平衡方法[J]. 环境科学研究, 1998, **11**(5): 51-54.
- [29] 王淑兰, 柴发合, 周末东, 等. 成都市大气可吸入颗粒物来源解析研究[J]. 地理科学, 2006, **26**(6): 717-721.
- [30] 刘章现, 王国贞, 郭瑞, 等. 河南省平顶山市大气降尘的化学特征及其来源解析[J]. 环境化学, 2011, **30**(4): 825-831.
- [31] 张学敏. 厦门市大气可吸入颗粒物源解析的研究[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(11): 51-54, 69-70.

## CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River .....	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes .....	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System .....	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes .....	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

# 《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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