

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析

武媛媛¹, 李如梅¹, 彭林², 端允^{1*}, 王海京¹, 李颖慧², 白慧玲¹, 牟玲¹

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 华北电力大学环境与化学工程系, 北京 102206)

摘要: 采集运城市区道路扬尘及5类单一尘源类样品(盐湖尘、土壤风沙尘、机动车尾气尘、建筑水泥尘和煤烟尘), 测定元素、离子和碳质组分含量并与其他城市比较, 在此基础上通过富集因子法和潜在生态风险评价法揭示道路扬尘的化学组成特征, 同时运用化学质量平衡模型解析道路扬尘的来源。结果表明, 与其他城市相比, Na 和 SO_4^{2-} 含量高, Si 含量相对较低是运城市道路扬尘化学组成的主要特征, Na、 SO_4^{2-} 和 Si 质量分数分别为12.197 0%、8.597 1%和9.112 3%; 富集因子计算结果表明道路扬尘中 Pb、Cu、Cr、V、As、Ni、Na、Zn 等元素的来源明显受到人为活动影响; 道路扬尘重金属潜在生态风险为强, 工业生产、化石燃料燃烧、机动车排放等人为源是影响道路扬尘生态风险等级的重要因素; 煤烟尘、建筑水泥尘和机动车尾气尘的化学成分谱与其他城市相似, 土壤风沙尘中 Na 和 SO_4^{2-} 含量相对较高, 运城市特有的盐湖尘的主要化学组分是 Na、 SO_4^{2-} , 含量分别为30.3%、22.7%; 化学质量平衡模型解析结果表明, 盐湖尘对道路扬尘贡献最大(53%), 其次是土壤风沙尘(21%), 机动车尾气尘(8%)、建筑水泥尘(7%)和煤烟尘(5%)的贡献几乎相当。

关键词: 道路扬尘; 化学组成; 源成分谱; 化学质量平衡模型; 盐湖尘

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1799-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609134

Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng

WU Yuan-yuan¹, LI Ru-mei¹, PENG Lin², DUAN Yun^{1*}, WANG Hai-jing¹, LI Ying-hui², BAI Hui-ling¹, MU Ling¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Environment and Chemical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Samples of particulate sources in Yuncheng including road dust, salt lake dust, coal dust, soil dust, construction, cement dust and vehicle exhaust dust were collected. Elements, ions and carbon species in particulate sources samples were analyzed. Enrichment factors and potential ecological risk assessment were used to analyze the characteristics of road dust, and chemical mass balance model was applied to identify the source of road dust. The results showed that, compared with other cities, the proportions of Na (12.197 0%) and SO_4^{2-} (8.597 1%) were relatively high while that of Si (9.112 3%) was low in road dust in Yuncheng, and enrichment factors showed that the sources of Pb, Cu, Cr, V, As, Ni, Na and Zn in road dust were obviously influenced by human activities; the potential ecological risk of heavy metals in road dust was high, which was affected by anthropogenic sources such as industrial production, the combustion of fossil fuels and vehicle exhaust; the profiles of coal dust, vehicle exhaust dust, construction and cement dust were similar to those of other cities, the Na and SO_4^{2-} concentrations in soil dust were relatively high, and the proportions of Na and SO_4^{2-} in salt lake dust were 30.3% and 22.7% respectively; salt lake dust was the largest contributor (53%) to road dust, followed by the soil dust (21%), vehicle exhaust dust (8%), construction and cement dust (7%), and coal dust (5%).

Key words: road dust; chemical composition; source profiles; chemical mass balance model; salt lake dust

随着经济发展和城市化进程的加速,我国大气污染的问题日益严峻^[1]。颗粒物是影响我国城市环境空气质量的首要污染物^[2,3]。颗粒物来源解析是定性和定量识别大气颗粒物来源的重要手段,对于制定有针对性的大气颗粒物污染控制措施、有效改善城市空气质量有重要的意义^[4,5]。化学质量平衡模型(CMB)是目前广泛使用的颗粒物源解析模型,污染源成分谱是化学质量平衡(CMB)模型的重要输入参数,也是开展受体模型研究的基础资料。为了使源解析结果更可靠,更符合当地实际,需要对本地源类的化学组成特征进行分析^[6]。

道路扬尘是城市大气颗粒物的主要贡献者,它

是各单一尘源类(土壤风沙尘、建筑水泥尘、煤烟尘、机动车尾气尘等)排放的颗粒物的混合物,既可以视为环境空气中颗粒物的排放源类,又可以视为各单一尘源类所排放的颗粒物的受体,其组成特征能够反映城市环境受到人为源影响的程度^[7]。本研究采集了运城市道路扬尘及5类单一尘源类样品(盐湖尘、土壤风沙尘、机动车尾气尘、建筑水泥尘

收稿日期: 2016-09-18; 修订日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373008); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41502324); 山西省高等学校科技创新项目(2015136)

作者简介: 武媛媛(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染, E-mail: wuyuan0692@163.com

* 通信作者, E-mail: duanyun@tyut.edu.cn

和煤烟尘),通过再悬浮的方式分离出其中粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,测定其元素、离子以及碳质组成的含量水平,并用化学质量平衡(CMB)模型解析了道路扬尘的来源,以为运城市治理道路扬尘污染提供科学依据,同时为运城市大气颗粒物来源解析提供基础数据。

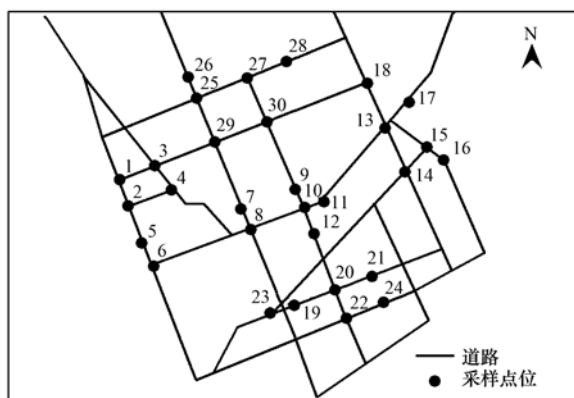
1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

本研究于2016年3月采集运城道路扬尘、盐湖尘、土壤风沙尘、煤烟尘、建筑水泥尘、机动车尾气尘共6类样品。

道路扬尘:采样点位分布于运城市区东、西、南、北、中这5个方位。每个方位布设6个采样点位,在市区主要道路(高速公路、主要干道、支路)的十字路口布点,布点周围避免烟尘、工业粉尘、建筑工地等人为污染源的干扰。在每个采样点上,采集路边的马路灰,隔离带、交通警察岗楼、交通指挥台等较长期积累的灰,用毛刷刷入袋内,每袋250 g左右,共采集30个样品,样品采集晾干后按照不同方位混样,共得到5个混合样。点位详情见图1。

盐湖尘:这一源类是运城市特殊的颗粒物源类。运城市盐湖位于运城市区东南方向,是世界三大硫酸钠型内陆盐湖之一,面积达 $132\ \text{km}^2$,含盐量极高,运城盐湖与运城市区位置见图2。在干枯的盐湖滩和盐湖附近的晒盐作业区域布点,共布设5个点位。在每个采样点上,用毛刷扫地表覆盖的盐粒及盐湖干涸的河滩土收集到纸袋中,每袋250 g左右,



采样点位1~6得到混样1; 采样点位7~12得到混样2;
采样点位13~18得到混样3; 采样点位19~24得到混样4;
采样点位25~30得到混样5

图1 道路扬尘采样点位示意

Fig. 1 Location of the sampling sites of road dust

共5个样品。

土壤风沙尘:在运城市中心区周边20 km范围内的不同距离上和主导风向的不同距离上,按梅花型布设采样点,在每个采样点上,采集地表土250 g左右,6个方位(东、西、南、北、中、上风向)共6个样品。

煤烟尘:选择典型的正常使用的以煤为燃料的生活锅炉(热源锅炉、城中村居民锅炉),工业锅炉(电厂),同时分别采集除尘器下的灰和烟道气中的尘,共13个样品。



图2 运城盐湖与运城市区位置示意

Fig. 2 Location of Yuncheng salt lake and Yuncheng City

建筑水泥尘:分别采集运城市水泥厂有组织排放尘(1个)、无组织排放尘(1个)及建筑工地无组织排放水泥尘(2个),共4个样品。

机动车尾气尘:通过在机动车排气筒上加装有滤膜的采样器,在道路上运行3 h左右,用滤膜收集机动车尾气灰尘,共采集18个样品。

从采样点采集的粉末样品,运回实验室后自然晾干,粉末样品过150目(泰勒标准筛150目= $0.104\ \text{mm}$)的不锈钢筛,按照要求将过筛后的各类样品分别进行混样,使用颗粒物再悬浮采样器,同时用聚丙烯滤膜(Whatman/90 mm)和石英滤膜(Pallflex/90 mm)平行采集粒径 $10\ \mu\text{m}$ 以下(PM_{10})的源样品,具体方法见文献[8]。聚丙烯滤膜用作元素分析,石英滤膜用作离子和碳分析。

进行颗粒物再悬浮采样前,聚丙烯滤膜在烘箱 60°C 条件下烘2 h;石英滤膜用锡箔纸包裹,于马弗炉(450°C)灼烧4 h,消除滤膜中的杂质和挥发分对称重和分析结果的影响。滤膜在烘烤后放入恒温恒湿设备箱中平衡24 h后用万分之一天平称量,记为 G_0 (平衡条件:温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $50\% \pm 5\%$)。采样后的滤膜在同样条件下平衡后称重,记为 G_1 。 $G_1 - G_0$ 即为滤膜上所采集的颗粒物质量。

1.2 样品分析

使用美国热电公司 ICP-9000 (N + M) 型等离子体发射光谱仪分析 17 种无机元素: Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb; 采用瑞士万通 861 型离子色谱仪对样品中水溶性离子 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 进行定量分析. 详细的样品前处理方法及分析方法参见文献 [9, 10].

总碳 (TC) 和有机碳 (OC) 的测定使用美国沙漠研究所的 DRI2001A 型碳分析仪, 具体分析方法见文献 [11].

1.3 富集因子法

富集因子法 (enrichment factor, EF) 可用于研究元素在道路扬尘中的富集程度, 从而识别元素的自然来源 (土壤风沙尘) 和人为来源 [12]. 选择一种相对浓度稳定的元素 r 作为参比元素, 常用的参比元素有 Ti、Fe、Al 和 Si. 计算公式如下:

$$EF_i = \frac{(\omega_i/\omega_r)_{\text{环境}}}{(\omega_i'/\omega_r')_{\text{背景}}} \quad (1)$$

式中, EF_i 为化学组分富集因子, ω_i 、 ω_r 分别为道路扬尘中测量元素 i 和参比元素的质量分数; ω_i' 、 ω_r' 分别为参比系统 (土壤背景值) 中测量元素 i 和参比元素的质量分数. 若 $EF_i < 10$, 认为元素相对于参比系统未富集, 主要来源为自然源, 由土壤岩石风化造成; 若 EF_i 在 $10 \sim 1 \times 10^4$ 范围, 认为元素被富集, 主要来源为人为源.

1.4 潜在生态风险分析法

潜在生态风险分析是以元素丰度响应为基本条件, 即沉积物中金属潜在生态危害指数 (RI) 与金属污染程度正相关, 且多种金属污染的生态危害具有加和性 [13, 14]. RI 的计算方法如下:

$$\omega_f^i = \frac{\omega_i}{\omega_n} \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot \omega_f^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \omega_f^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{\omega_i}{\omega_n} \quad (4)$$

式中, ω_f^i 为第 i 种重金属的污染系数; ω_i 为样品中第 i 种重金属含量的质量分数实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; ω_n 为第 i 种重金属的质量分数背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险指数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数, 反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性; RI 为多种重金属的潜在生态风险指数.

1.5 化学质量平衡模型

化学质量平衡 (chemical mass balance, CMB) 模

型是由一组线性方程构成, 表示每种化学组分的受体浓度等于各种排放源类的成分谱中这种化学组分的含量和各种排放源对受体的贡献浓度乘积的线性和, 其计算公式 [15, 16] 如下:

$$\rho = \sum_{j=1}^J S_j \quad (5)$$

$$\rho_i = \sum_{j=1}^J (F_{ij} \times S_j) \quad (6)$$

式中, ρ 为受体道路扬尘中的总质量浓度测量值, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; j 为源类序号; J 为源类的总数; S_j 为 j 种源类贡献的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_i 为受体道路扬尘中化学组分 i 的质量浓度测量值, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; F_{ij} 为 j 种源类的受体扬尘中化学组分 i 的质量分数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

当化学组分总数 (I) $\geq J$ 时, 式 (6) 解为正, 才能求得 S_j ; 再根据式 (7) 求得 j 种源类的分担率 ($\eta_j, \%$)

$$\eta_j = \frac{S_j}{\rho} \times 100\% \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 道路扬尘化学组成特征

2.1.1 道路扬尘化学成分谱

运城市道路扬尘化学成分谱见表 1. 质量分数大于 10% 的化学组分从大到小依次为: Na > TC; 在 1% ~ 10% 之间的化学组分从大到小依次为: Si > SO_4^{2-} > OC > Ca > Fe > Al > K > Mg; 小于 1% 的化学组分从大到小依次为: K^+ > NO_3^- > Cl^- > Cr > V > Ti > Cu > Pb > Zn > Mn > Ni > As > Co. 可以看出, 运城市道路扬尘的化学组成中以地壳类元素 (Na、Si、Ca、Fe、Al、K、Mg 等)、碳质组分 (TC、OC) 以及 SO_4^{2-} 为主.

表 1 还给出了运城市与其他 4 个城市 (上海 [17]、西安 [18]、北京 [19]、西宁 [20]) 道路扬尘化学成分谱的比较. 由表 1 中数据可知, 运城市道路扬尘整体呈现 Na 和 SO_4^{2-} 含量高, Si 含量相对较低的特征. 运城市道路扬尘化学组成中 Na 的含量明显高于其他 4 个城市, 这可能是由于运城市特有的源类盐湖尘对道路扬尘有较大的贡献, 盐湖尘化学组成中的 Na 含量高, 导致道路扬尘中 Na 含量较高; 运城市道路扬尘化学组成中 SO_4^{2-} 的含量明显高于上海 (其余 3 个城市未测定 SO_4^{2-} 含量), 这是因为运城盐湖是硫酸钠型盐湖, 盐湖尘中 SO_4^{2-} 的含量高, 导致道路扬尘中 SO_4^{2-} 的含量较大; 关于盐湖尘的化学组成在 2.2 节中详细叙述. 运城市道路扬尘

Si 含量明显低于其他 4 个城市,这可能是由于盐湖尘对道路扬尘的贡献比例较大,相应的削弱了土壤风沙尘(Si 含量较高)对道路扬尘的贡献比例. K、Ca、Mg、Al、Fe、Zn、Co、Mn 的含量与其他城市相当,而 Pb、Cu、Ni、Cr、V、TC 的含量较其他城市高.

富集因子法可以用来研究道路扬尘中的元素受人为源影响的程度,国际上多选用 Al、Fe 或 Si 作为参比元素,Al 化学性质较稳定且是分析精度最高最广泛使用的参比元素^[9, 21],故本研究选取 Al 作为参比元素,各元素背景值为山西省 A 层土壤背景(取算术平均值, Si 取泰勒丰度)^[22],根据公式(1),计算运城市道路扬尘富集因子,结果见图 3. 从中可知,道路扬尘中富集因子小于 10 的元素有 Ti、Si、Mn、Co、Ca、Mg、K、Fe,认为这些元素没有受到人为源的影响;富集因子在 10~1×10⁴ 范围的元素从大到小排序为: Pb>Cu>Cr>V>As>Ni>Na>Zn,认为这些元素的来源明显受到人为活动的影响. 富集因子大于10的元素中, Pb是燃煤或燃油飞灰的

典型元素, Cr 主要来源于煤及石油气的燃烧废气以及各种工业制造^[23], V 的主要人为来源是煤、石油等燃料的燃烧^[24], As 主要来源于有色金属冶炼及煤炭燃烧^[25, 26], Ni 主要来源于燃煤、冶炼和柴油车废气^[23],可见道路扬尘中富集的这些污染元素与各种工业生产、燃料燃烧、机动车尾气排放等有关. 而 Na 也是富集因子大于 10 的元素,结合运城当地实际,道路扬尘中 Na 的富集可能是受盐湖尘的影响.

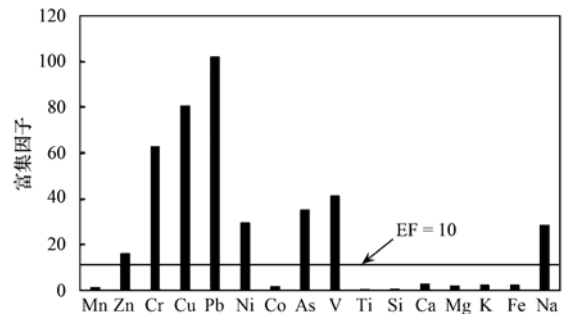


图3 运城市道路扬尘中元素的富集因子
Fig. 3 Enrichment factors of elements
in road dust in Yuncheng City

表1 运城市道路扬尘化学成分谱与其他城市的比较/%

Table 1 Source profiles of road dust in Yuncheng City and four other cities/%

项目	运城	上海	西安	北京	西宁
Na	12.197 0±0.441 1	0.785 6	1.392 1	2.257 6	1.180 0
Mg	1.064 5±0.370 6	0.889 3	1.341 7	1.119 9	1.560 0
Al	2.212 3±0.965 5	2.460 6	4.733 4	3.986 0	4.990 0
Si	9.112 3±1.023 2	18.285	21.114 0	—	24.870 0
K	1.647 5±0.170 2	0.846 4	1.443 1	—	1.400 0
Ca	4.865 2±2.901 5	5.772 2	6.601 1	5.236 1	6.690 0
Ti	0.097 6±0.107 1	—	—	—	—
V	0.098 9±0.057 2	0.005 4	0.005 8	—	0.008 0
Cr	0.135 3±0.094 0	0.009 5	0.009 6	—	0.020 0
Mn	0.033 8±0.010 4	0.079 3	0.050 1	0.055 6	0.050 0
Fe	2.604 0±1.540 7	2.345 8	3.099 0	2.968 3	2.780 0
Co	0.000 7±0.000 4	0.001	0.001 0	0.001 6	—
Ni	0.033 2±0.015 5	0.002 5	0.002 9	0.007 2	0.005 0
Cu	0.075 7±0.037 7	0.006 3	0.007 4	0.004 3	—
Zn	0.043 4±0.003 3	0.017 3	0.030 1	0.016 3	0.020 0
As	0.012 1±0.068 1	—	—	—	—
Pb	0.056 2±0.322 1	0.007 4	0.010 4	0.012 6	0.010 0
TC	10.173 9±1.322 5	2.002	—	—	—
OC	6.233 5±0.936 6	1.293	—	—	—
Cl ⁻	0.275 2±0.095 5	—	—	—	—
NO ₃ ⁻	0.203 7±0.025 4	0.146 7	—	—	—
SO ₄ ²⁻	8.597 1±1.233 2	0.073 2	—	—	—
K ⁺	0.654 4±0.211 1	—	—	—	—

2.1.2 道路扬尘中重金属的潜在生态风险

根据 Hakanson 的研究^[14],潜在生态风险评价指标分级见表 2. 本研究对 8 种重金属 Mn、Zn、Cr、

Cu、Pb、Ni、Co、As 进行潜在生态风险特征评价,其毒性系数分别为 1、1、2、5、5、5、5、10,元素背景值取山西省 A 层土壤背景(算术平均值)^[22]. 根

据公式(2)~(4)计算运城市道路扬尘重金属潜在生态风险指数,结果见表3。

表2 潜在生态风险评价指标分级

Table 2 Classification criteria of the potential ecological risk index			
E_i^i	单因子生态风险指数	RI	总的潜在生态风险指数
<40	轻微	<150	轻微
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较强	300~600	强
160~320	强	>600	极强
>320	极强		

对照表3可知,在道路扬尘中,Pb的潜在生态风险程度为强,As、Cu的潜在生态风险程度较强,Ni、Cr的潜在生态风险程度为中,Mn、Zn、Co的潜在风险程度为轻微。运城市道路扬尘多种重金属总的潜在生态风险指数为547.6,潜在的生态风险为强。这些重金属元素大多来源于工业生产、化石燃料的燃烧、机动车排放等人为源,表明这些人为源是影响道路扬尘中重金属的生态风险的重要因素。

表3 运城市道路扬尘重金属潜在生态风险指数

Table 3 Potential ecological risk index of heavy metals in road dust of Yuncheng City									
项目	Mn	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	总潜在生态风险指数 RI
背景值 $C_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	554.0	75.5	61.8	26.9	15.8	32.0	9.9	9.8	
毒性系数 T_i^i	1	1	2	5	5	5	5	10	—
单因子潜在生态风险指数 E_i^i	0.6	5.7	43.8	140.7	177.8	51.9	3.5	123.5	547.6

2.2 各单一尘源成分谱

运城市盐湖尘、土壤风沙尘、机动车尾气尘、建筑水泥尘、煤烟尘的成分谱见图4。

从图4可以看出,煤烟尘中大于10%的组分为Al、Si、Ca、TC;建筑水泥尘中大于10%的组分为Si、Ca、TC,其中Ca质量分数最高,达到23.7262%;机动车尾气尘中TC质量分数高达89.8712%;土壤风沙尘中大于10%的组分为Na、Si、TC,其中Si质量分数最高,达到18.3005%。运城市煤烟尘、建筑水泥尘和机动车尾气尘与长治^[27]、太原^[28]、重庆^[29]、宁波^[30]等地的颗粒物源成分谱相似,而土壤风沙尘中Na和SO₄²⁻质量分数相对较高。盐湖尘是运城市特有的一种颗粒物源类,运城盐湖是硫酸钠型内陆盐湖,盐湖尘中Na、SO₄²⁻含量高,分别为30.3%、22.7%,含有少量的地壳元素(Mg、Al、Si、Ca)、碳质组分(TC)、离子组分(Cl⁻、NO₃⁻、K⁺)。

源的特征元素也称为标识元素,是某源类的排

放特征区别于其它源类的重要标志。某一源类成分谱中有些元素对源贡献值和对贡献值的标准偏差影响的程度不一样,影响大的表示该元素的灵敏度高,影响小的表示灵敏度低。特征元素指那些灵敏度最高的元素。在CMB模型的算法当中,灵敏度(modified pseudo-inverse matrix, MPIN)矩阵是反映元素对CMB模型模拟灵敏程度的矩阵,该矩阵提供了判定源特征元素的方法^[6]。表4是运城市主要源类的MPIN矩阵,其中MPIN绝对值为1的元素即为灵敏元素,也就是相应源的特征元素。由表4可知,Al是运城煤烟尘的特征元素,Si是运城土壤风沙尘的特征,Ca是运城建筑水泥尘的特征元素,TC是运城机动车尾气尘的特征元素,Na是运城盐湖尘的特征元素。Al、Si、Ca、TC、Na等元素在道路扬尘中含量较高,说明煤烟尘、土壤风沙尘、建筑水泥尘、机动车尾气尘、盐湖尘是影响运城市道路扬尘的重要因素。

表4 运城市主要颗粒物源类MPIN灵敏度矩阵

Table 4 MPIN sensitivity matrix of main particulate matter of Yuncheng City					
源类组分	煤烟尘	土壤风沙尘	建筑水泥尘	机动车尾气尘	盐湖尘
Na	-0.03	-0.11	-0.20	-0.20	1.00
Al	1.00	-0.14	-0.25	-0.14	0.19
Si	-0.21	1.00	-0.02	0.30	-0.78
Ca	-0.38	-0.37	1.00	-0.09	-0.17
TC	-0.02	-0.02	-0.01	1.00	0.01

2.3 道路扬尘来源解析

拟定受体道路扬尘中各化学组分的总质量浓度为1 μg·m⁻³,根据表1计算得到道路扬尘中化学组分*i*的质量浓度ρ_{*i*},将ρ_{*i*}与*F_{ij}*输入南开大学

CMB2.0模型,同时为了诊断CMB模型的拟合优度,还需输入受体道路扬尘化学组分浓度谱的标准偏差σ_{ρ_{*i*}}以及源成分含量谱的标准偏差σ_{*F_{ij}*}。选取Al、Si、Ca、TC、OC、Na、Mn、Fe、Zn、Cu共10种

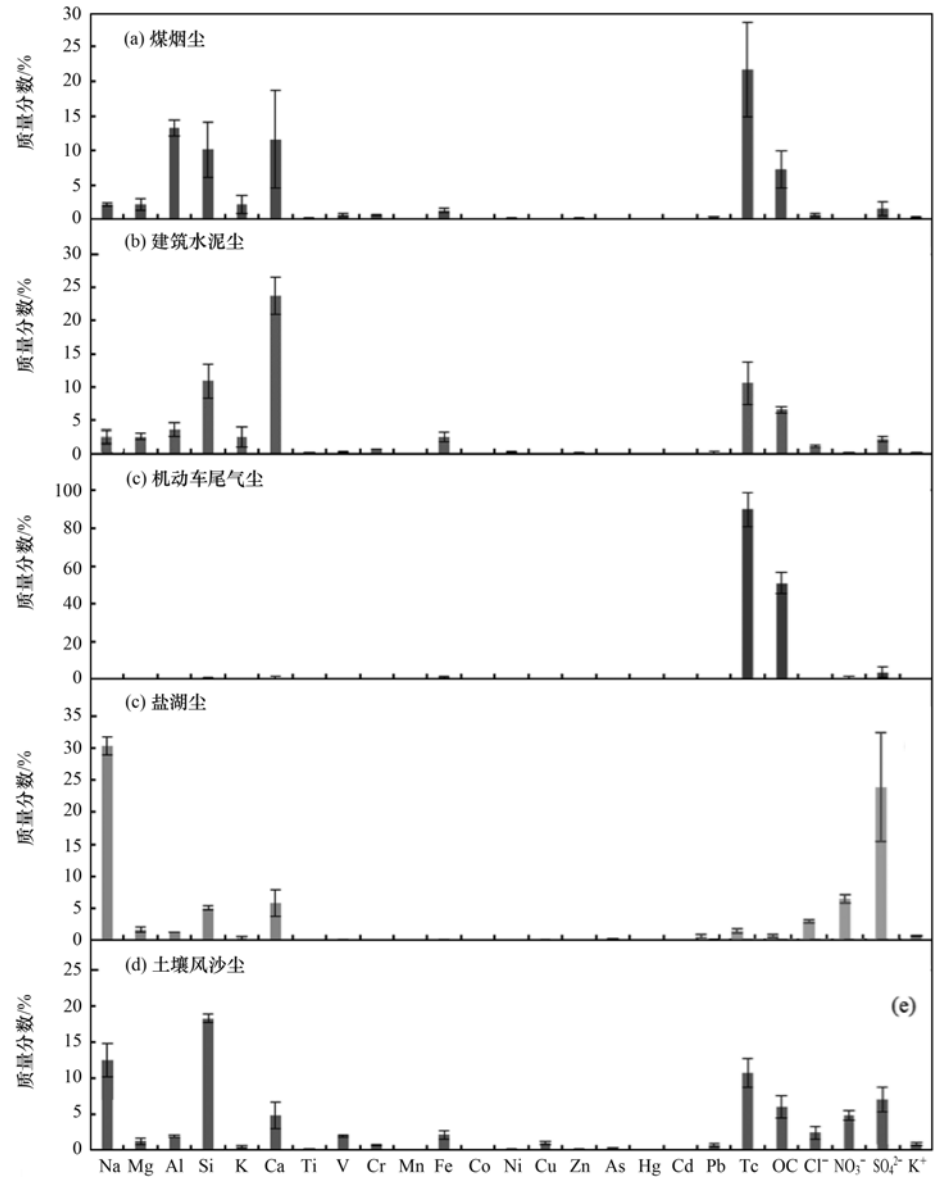


图4 运城市单一尘源类成分谱

Fig. 4 Source profiles of particulate matters in Yuncheng City

元素参与计算,源解析结果见表5.在CMB模型的拟合优度诊断中,回归系数(R^2)等于化学组分浓度计算值的方差与测量值的方差之比,该值越接近1,说明源贡献值的计算值与测量值拟合得越好,本次源解析计算的回归系数(R^2)为0.91,可见本次模型拟合结果较好.

表5 各单一源类对运城市道路扬尘的分担率

Table 5 Source apportionment of road dust in Yuncheng City

源类	分担率/%
土壤风沙尘	21
盐湖尘	53
机动车尾气尘	8
建筑水泥尘	7
煤烟尘	5
合计	94

从表5可知,盐湖尘对道路扬尘分担率最高,达到53%,其次是土壤风沙尘(21%)、机动车尾气尘(8%)、建筑水泥尘(7%)、煤烟尘(5%).盐湖尘是运城市特有的一种颗粒物源类.运城市盐湖位于运城市区东南方向,其面积达132 km²(见图2).湖内盐田硝畦纵横如织,有大量堆积的芒硝,仅小部分进行了围挡或遮蔽,裸露的盐湖滩表面鲜有植被生长,未遮蔽的盐丘和裸露的盐湖滩在一定的动力(风力、机动车行驶等)扰动下,表层颗粒物被扬起而进入大气环境并扩散一定距离,且盐湖位于市区常年主导风向东南风(SE)的上风向,对市区道路扬尘及大气颗粒物影响很大.

3 结论

(1) 运城市道路扬尘质量分数大于 10% 的化学组分为:Na 和 TC;在 1% ~ 10% 之间的化学组分从大到小依次为:Si > SO₄²⁻ > OC > Ca > Fe > Al > K > Mg;小于 1% 的化学组分从大到小依次为:K⁺ > NO₃⁻ > Cl⁻ > Cr > V > Ti > Cu > Pb > Zn > Mn > Ni > As > Co,与其他城市相比,运城市道路扬尘化学组成的主要特征是 Na、SO₄²⁻ 含量高而 Si 含量相对较低。

(2) 运城市道路扬尘重金属潜在生态风险指数为 547.6,潜在的生态风险为强,单因子生态风险指数为中等以上的 Cr、Ni、As、Cu、Pb 等元素主要来源于工业生产、化石燃料燃烧、机动车排放等人为源。

(3) 运城市大气颗粒物单一尘源的化学成分谱的测定结果表明,运城市特有的盐湖尘的主要组分是 Na (30.3%) 和 SO₄²⁻ (22.7%);煤烟尘、建筑水泥尘和机动车尾气尘的化学组成与其他城市相似,土壤风沙尘中 Na 和 SO₄²⁻ 含量与其他城市比相对较高。

(4) 根据化学质量平衡原理,采用化学质量平衡模型计算各单一尘源对道路扬尘的分担率。盐湖尘对道路扬尘贡献最大(53%),其次是土壤风沙尘(21%),机动车尾气尘(8%)、建筑水泥尘(7%)和煤烟尘(5%)的贡献几乎相当。

(5) 盐湖尘是运城市特有的颗粒物源类,不仅对道路扬尘贡献很大,也是大气颗粒物的重要来源,在进行颗粒物源解析工作时,应建立本地化的源成分谱,以提高源解析工作的可靠性。

参考文献:

- [1] 平措. 我国城市大气污染现状及综合防治对策[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1): 18-21.
Ping C. Status and comprehensive control countermeasures of urban air pollution in China[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(1): 18-21.
- [2] 游燕, 白志鹏. 大气颗粒物暴露与健康效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(2): 123-132.
You Y, Bai Z P. Research advances in exposure to ambient particulate matter and health effects[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(2): 123-132.
- [3] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, et al. Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(10): 1214-1226.
- [4] 冯银厂, 白志鹏, 朱坦. 大气颗粒物二重源解析技术原理与应用[J]. 环境科学, 2002, 23(S): 106-108.
Feng Y C, Bai Z P, Zhu T. The principle and application of

- improved-source-apportionment technique of atmospheric particulate matter[J]. Environmental Science, 2002, 23(S): 106-108.
- [5] 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾追因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 344-352.
He H, Wang X M, Wang Y S, et al. Formation mechanism and control strategies of haze in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 344-352.
- [6] 孙敬敏. 污染源成分谱分析及 CMB 应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
Sun J M. Study on source profiles and the application of CMB model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [7] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii[J]. Environmental Pollution, 2000, 110(3): 483-495.
- [8] Zhao P S, Feng Y C, Zhu T, et al. Characterizations of re-suspended dust in six cities of North China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30): 5807-5814.
- [9] 王燕, 彭林, 李丽娟, 等. 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 82-87.
Wang Y, Peng L, Li L J, et al. Chemical composition and source apportionment of re-suspended dust in Jincheng[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 82-87.
- [10] 刘凤娟, 彭林, 牟玲, 等. 忻州市市区大气颗粒物中的元素组成特征[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 313-320.
Liu F X, Peng L, Mu L, et al. Characteristic of elements in atmospheric particulate matters in air of Xinzhou City[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(2): 313-320.
- [11] Wu L, Feng Y C, Wu J H, et al. Secondary organic carbon quantification and source apportionment of PM₁₀ in Kaifeng, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(10): 1353-1362.
- [12] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4431-4438.
Li L J, Wen Y P, Peng L, et al. Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4431-4438.
- [13] 林海鹏, 武晓燕, 战景明, 等. 兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 810-815.
Lin H P, Wu X Y, Zhan J M, et al. Analysis of atmospheric particles and heavy metals character at the area of Lanzhou City in summer and winter[J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 810-815.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] Sharma V K, Patil R S. Chemical mass balance model for source apportionment of aerosols in Bombay[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 29(1): 75-88.
- [16] Sattler M L, Liljestrand H M. Chemical mass balance model with fractionation for apportioning PM_{2.5}: a test case for Los Angeles traffic sources[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, 55(9): 1335-1344.
- [17] 陈筱佳, 程金平, 江璇, 等. 上海市中心城区主干道道路扬

- 尘组分特征及来源解析[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(6): 10-13.
- Chen X J, Cheng J P, Jiang X, *et al.* Study on the chemical compositions characteristics and source apportionment on road dust of main roads in Shanghai central district[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, **37**(6): 10-13.
- [18] 唐艳荣, 吴枫, 曹军骥, 等. 西安道路尘中元素分布特征及其来源分析[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(12): 22-30.
- Tang Y R, Wu F, Cao J J, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of road dust in Xi'an[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, **32**(12): 22-30.
- [19] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 1-8.
- Han L H, Zhuang G S, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of re-suspended road dust and its significant effect on the airborne particulate pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 1-8.
- [20] 王伟. 西宁市市区环境空气中总悬浮颗粒物来源解析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2004, **22**(5): 65-68, 74.
- Wang W. Source analysis of TSP in urban atmosphere of Xining [J]. Journal of Qinghai University, 2004, **22**(5): 65-68, 74.
- [21] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 用富集因子法评价我国城市土壤风沙尘元素的污染[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2006, **39**(2): 94-99.
- Ji Y Q, Zhu T, Feng Y C, *et al.* Application of the enrichment factor to analyze the pollution of elements in soil dust in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2006, **39**(2): 94-99.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [23] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院大学学报, 2013, **30**(2): 145-155.
- Tan J H, Duan J C. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, **30**(2): 145-155.
- [24] Wang G, Oldfield F, Xia D S, *et al.* Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: a case study from the city of Lanzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 289-298.
- [25] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature, 1988, **333**(6169): 134-139.
- [26] Thomaidis N S, Bakeas E B, Siskos P A. Characterization of lead, cadmium, arsenic and nickel in PM_{2.5} particles in the Athens atmosphere, Greece[J]. Chemosphere, 2003, **52**(6): 959-966.
- [27] 张建强, 牟玲, 白慧玲, 等. 长治市大气环境中可吸入颗粒物来源研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2012, **35**(4): 737-742.
- Zhang J Q, Mu L, Bai H L, *et al.* Study on source appointment of PM₁₀ in air environment of Changzhi, Shanxi[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2012, **35**(4): 737-742.
- [28] 吴建会, 朱坦, 冯银厂, 等. 太原市环境空气中 TSP 和 PM₁₀ 来源解析[J]. 城市环境与城市生态, 2008, **21**(4): 40-42.
- Wu J H, Zhu T, Feng Y C, *et al.* Analytic studies on source of TSP and PM₁₀ in environmental air of Taiyuan City[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2008, **21**(4): 40-42.
- [29] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(12): 1387-1394.
- Ren L H, Zhou Z E, Zhao X Y, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in urban areas of Chongqing[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(12): 1387-1394.
- [30] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 来源解析[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 549-555.
- Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in urban area of Ningbo[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(5): 549-555.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)