

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM _{2.5} 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 PM _{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 PM _{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH ₄ ⁺ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征

王士宝, 姬亚芹*, 李树立, 张伟, 张蕾

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 为探究天津市春季道路降尘中元素污染特征及来源, 于 2015 年春季采集了天津市道路降尘样品, 通过再悬浮得到 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 滤膜样品, 继而测定了滤膜样品中 16 种元素的含量, 通过非参数检验、分歧系数法、富集因子法等研究了道路降尘中元素的污染特征、来源和成分谱的相似性。结果表明, 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量分数平均值在 1% ~ 20% 之间的元素从大到小依次为: $Si > Al > Ca > Fe > Mg > K > Na$; PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中元素成分谱分歧系数为 0.06, 表明两者元素成分谱很相似; PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中, 元素 Cd 和 Cr 强烈富集, Zn、Cu、Pb 和 As 显著富集; 道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素主要来源于土壤风沙尘、建筑尘、交通尘(汽车尾气的排放、轮胎磨损和刹车片磨损)和煤烟尘。

关键词: 道路降尘; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; 元素特征; 分歧系数; 富集因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-0990-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704299

Characteristics of Elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Road Dust Fall During Spring in Tianjin

WANG Shi-bao, JI Ya-qin*, LI Shu-li, ZHANG Wei, ZHANG Lei

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To explore the element pollution characteristics and sources of road dust fall, road dust fall samples were collected during spring in Tianjin and suspended to obtain $PM_{2.5}$ and PM_{10} , 16 elements were analyzed, and then their characteristics, sources, and similarities were studied by nonparametric tests, the coefficient of divergence, and enrichment factor. The results showed that the mass fraction (1% - 20%) in sequential order of the elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Tianjin road dust fall were $Si > Al > Ca > Fe > Mg > K > Na$. The coefficient of divergence of elements in PM_{10} and $PM_{2.5}$ was 0.06, indicating that the elements profiles of PM_{10} might be similar to $PM_{2.5}$. The elements of Cd and Cr in PM_{10} and $PM_{2.5}$ were at a high level of enrichment degree, and Zn, Cu, Pb, and As showed significant enrichment. The main sources of the elements in PM_{10} and $PM_{2.5}$ road dust fall in Tianjin were soil dust, construction dust, traffic dust (motor vehicle exhaust, tire wear, and brake wear), and coal combustion.

Key words: road dust fall; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; element characteristics; coefficient of divergence; enrichment factor

近年来,我国城市空气质量整体有所改善,但仍不容乐观。《中国环境状况公报》显示,2015年,京津冀地区13个地级以上城市达标天数比例32.90%~82.30%,平均52.40%,比2014年上升9.6个百分点。天津是我国北方最大的沿海开放城市,2015年,全市环境空气质量超标天数为145d,其中以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的有110d,占75.9%。大气颗粒物浓度的增加,不仅会降低大气能见度,还会影响人们的生产生活以及身体健康。

扬尘对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献率可达到约20.0%,而道路扬尘是扬尘的重要组成部分^[1,2]。道路扬尘通过干湿沉降降落在道路周边,形成道路降尘。道路降尘中的Cd、Cu和Pb等重金属元素易沉积在水、土壤和植物中,通过食物链作用,可危害生态环境和人体健康^[3]。目前,国内外已有关于道路降尘的相关研究^[4~7],但是这些研究大都集中在颗粒物排放清单,很少有关于其污染组分的研究;另

外,有关降尘中元素的研究基本集中在大气降尘^[8~11],少有关于道路降尘的研究。因此,本研究采集了天津市5种道路类型的道路降尘样品,通过再悬浮装置将颗粒物采集到滤膜上并分析其元素含量,探讨了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的元素组分特征和污染来源,旨在为天津市道路降尘的来源解析和改善区域环境质量提供支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样道路包括主干道、次干道、支路、外环线 and 快速路这5种道路类型,详见图1。其中,主干道包括卫津路和复康路;次干道包括黄河道和鞍山西

收稿日期: 2017-04-30; 修订日期: 2017-08-23

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409004)

作者简介: 王士宝(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 2273371853@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiyuqin@nankai.edu.cn

道;支路包括南开二纬路、白堤路和迎水道;快速路包括密云路和红旗南路;环线包括外环线西路(1、2、3)。每条道路选择双侧对应位置共设置8个点位,每个点位分1.5 m和2.5 m两个高度,采样时间为2015年3月22日至5月23日。采用定制的聚氯乙烯材质的降尘缸,内外径和高分别为15、16

和30 cm,外形为圆柱体,缸低平整。采样前,清洗降尘缸并在实验室阴干,然后将降尘缸绑在路灯杆上采集样品,降尘缸均对着道路一侧放置并避开路口、单位门口、公交站、施工路段等局部污染源,采样结束后收取缸内降尘,详见李树立等^[12]的研究。



图1 采样路段及采样点位示意

Fig. 1 Sampled roads and sampling points

1.2 样品处理与分析

将降尘样品放入干燥器平衡3 d后,然后分别通过20目、200目筛,将一条道路上不同高度上的样品混合均匀通过再悬浮采样器(NK-ZXF)^[13]悬浮到滤膜上,分别得到 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 两种粒径的滤膜样品;然后将滤膜样品在恒温恒湿天平室平衡72 h后称重。

使用美国Agilent 7500a型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析Na、K、Cr、Cu、Zn、As、Pb、Mn、Ti、Cd元素。用电感耦合等离子光谱法(ICP-OES)分析Al、Mg、Ca、Fe、Ba和Si元素。

分析时,用盐酸-硝酸高温密闭酸性消解法处理滤膜,冷却定容制备成样品溶液。样品溶液经雾化后,通过载气,将形成的含待测元素的气溶胶输送至等离子炬管中,样品分子几乎完全解离,ICP发出的光通过入射狭缝、准直、分光后,经检测器检测,进行定性定量分析。

1.3 质量控制

测量过程中,各元素测定值的相对误差要小于5%,各元素测定值的相对标准偏差要小于5%,才能满足分析方法要求。样品测定时,每测定10个样品,要进行单点校准和空白测定,所有检测结果均要满足质控要求。

2 结果与讨论

2.1 道路降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中元素质量分数水平

天津市道路降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中16种元素的质量分数如图2。

图2表明,天津市道路降尘 $PM_{2.5}$ 中质量分数平均值超过1%的元素依次为Si>Al>Ca>Fe>Mg>K>Na,其中,Si元素的质量分数平均值最高,为18.13%;质量分数平均值低于1%的元素大小顺序为Ti>Cr>Zn>Mn>Ba>Cu>Pb>As>Cd,其中,Ti元素质量分数平均值最高,为0.39%。 PM_{10} 中质量分数平均值超过1%的元素大小顺序与 $PM_{2.5}$ 中的元素排序完全相同;质量分数平均值低于1%的元素大小顺序为Ti>Cr>Zn>Ba>Mn>Cu>Pb>As>Cd,其中,Ti元素质量分数平均值最高,为0.42%;除了Ba和Mn元素的大小顺序稍有变化之外, PM_{10} 中的元素含量大小关系与 $PM_{2.5}$ 中均相同。

Si、Al、Ca、Fe、Mg、K和Na等地壳元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数均较高,其中,Si是土壤风沙尘的标识组分;Al是煤烟尘的标识元素,同时也是地壳的重要元素;Ca是建筑水泥尘的标识元素^[14]。天津市春季早风同期且风速较大,土壤风蚀较重,导致道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中Si和Al等土壤

元素质量分数较高. 另外, 春季建筑活动较多, 施工过程中产生的建筑水泥尘等导致道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 Ca 元素质量分数较高. 这表明土壤风沙尘、建筑水泥尘和煤烟尘是影响天津春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素质量分数水平的主要因素.

将元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数比值的中间值设为 $\varphi(PM_{2.5}/PM_{10})$. 由图 3 可知, 道路降尘中元素的 $\varphi(PM_{2.5}/PM_{10})$ 介于 0.8 ~ 1.1 之间.

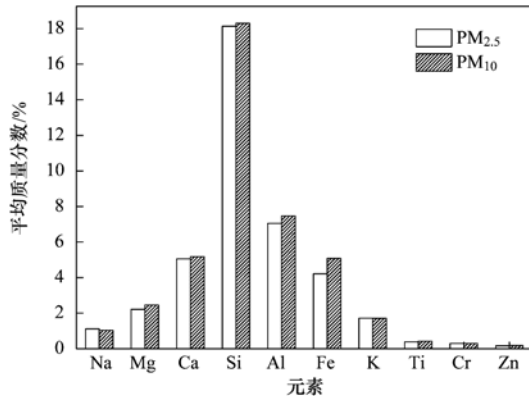


图 2 天津市道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的质量分数

Fig. 2 Mass fraction of elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in road dust fall in Tianjin

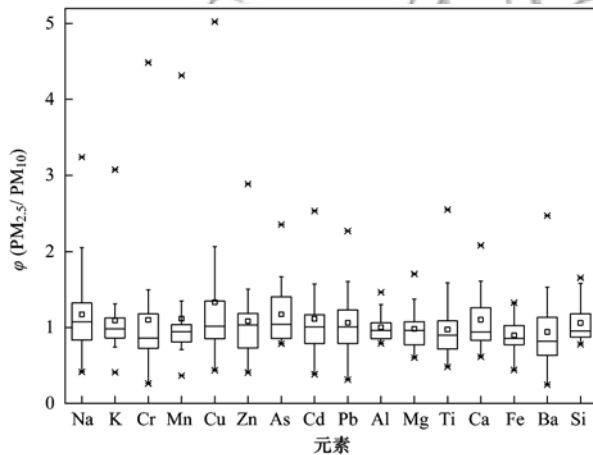
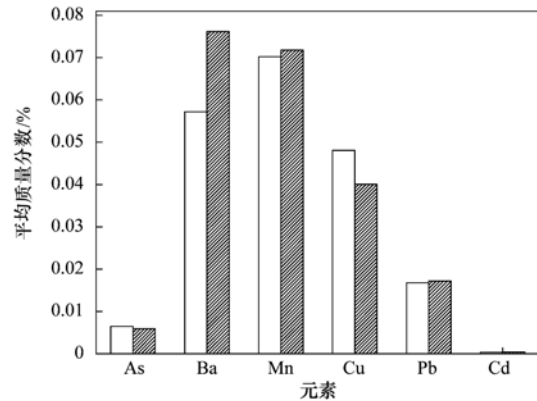


图 3 天津市道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的质量分数比值

Fig. 3 Ratio of element mass fraction in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in road dust fall in Tianjin

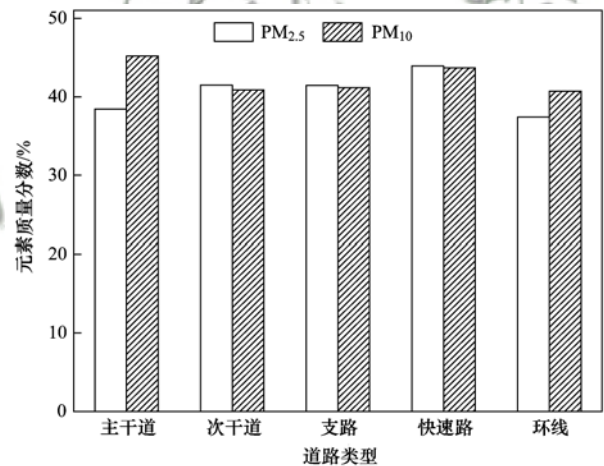


图 4 不同道路类型道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素质量分数和

Fig. 4 Sum of the mass fraction of elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in road dust fall of different roads

图 4 为不同类型道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素质量分数和, 从中可知, $PM_{2.5}$ 中不同元素质量分数和在快速路最高, 环线最低; PM_{10} 中不同元素质量分数和在主干道最高, 环线最低. 除主干道和环线 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的质量分数和差异较大外, 其他道路类型元素在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数和差异均很小.

为探究不同元素质量分数在两种粒径间的差异, 运用 SPSS 16.0 软件对道路降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$

Na、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 元素的 $\varphi(PM_{2.5}/PM_{10})$ 均大于 1, Na 元素的中位值最大, 为 1.07; K、Cr、Mn、Al、Mg、Ti、Ca、Fe、Ba 和 Si 元素的 $\varphi(PM_{2.5}/PM_{10})$ 均小于 1, K 元素的中位值最大, 为 0.98, Ba 元素的中位值最小, 为 0.82. 可知, Na、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 元素更容易在 $PM_{2.5}$ 上富集, K、Cr、Mn、Al、Mg、Ti、Ca、Fe、Ba 和 Si 元素更容易在 PM_{10} 上富集.

中元素的质量分数进行两相关样品的非参数检验, 可得 Na(0.32)、K(0.72)、Cr(0.27)、Mn(0.19)、Cu(0.43)、Zn(0.97)、As(0.12)、Cd(0.69)、Pb(0.78)、Al(0.45)、Mg(0.41)、Ti(0.06)、Ca(0.69)、Ba(0.14) 和 Si(0.93) 元素的 P 值均大于 0.05, 说明这 15 种元素在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中质量分数的差异无统计学意义; Fe(0.01) 的 P 值小于 0.05, 说明 Fe 元素在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中质量分数的差异有统计学意义, 在 PM_{10} 中的质量

分数高于 $PM_{2.5}$ 。

2.2 基于分歧系数法的不同粒径间成分谱相似性比较

分歧系数(coefficient of divergence, CD)可用来确定两成分谱之间的相似程度^[15], 本文用分歧系数来研究天津市不同道路类型道路降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 成分谱的相似性, 其计算公式^[16]见式(1), 结果见图 5。

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{X_{ij} - X_{jk}}{X_{ij} + X_{jk}} \right)^2} \quad (1)$$

式中, CD_{jk} 为分歧系数; p 为参与计算的元素的总个数; i 为元素序号; X_{ij} 、 X_{jk} 分别为两种粒径成分谱中 i 元素的质量分数, %。

如果两个成分谱组成非常相似, CD 将趋近于

0; 如果组成相差极大, 则 CD 趋近于 1^[17]。姬亚芹^[18]的研究认为分歧系数在 0~0.2 的两个源成分谱必定相似、0.2~0.5 可能相似、0.5~1 必定不相似。因此本研究将分歧系数 0.2 作为判断两个成分谱是否相似的分界点。

图 5 表明, 主干道、次干道、支路、快速路和环线这 5 种道路类型两种粒径间的分歧系数分别为 0.09、0.08、0.06、0.12 和 0.11, 均小于 0.2。综合天津市春季不同道路类型降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中元素质量分数, 计算得到道路降尘中两种粒径成分谱的 CD 值为 0.06, 小于 0.2。可见, 天津市春季道路降尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的成分谱较相似, 在未来的降尘或者颗粒物来源解析工作中可以只采集一个粒径, 也可以用来校验所采集数据的质量。

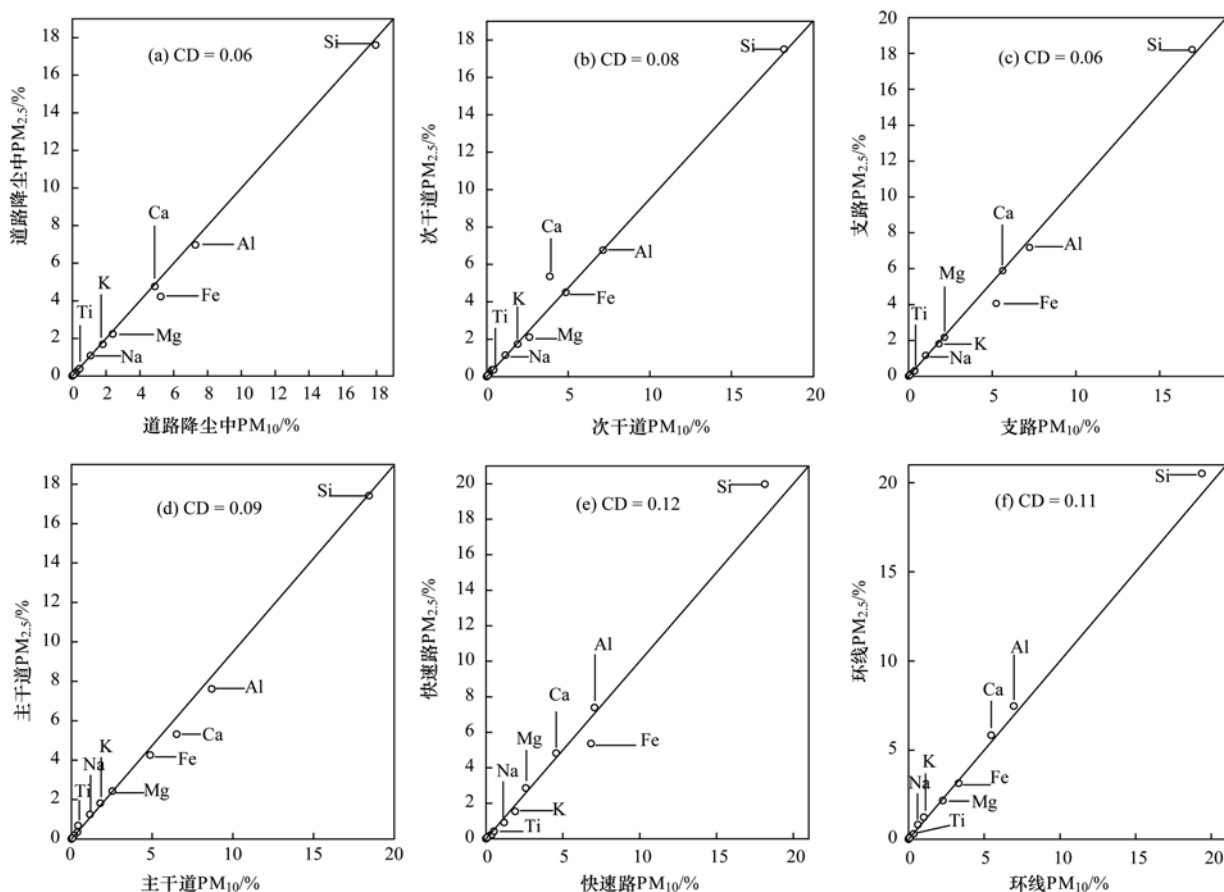


图 5 不同道路类型两种成分谱之间的相似性

Fig. 5 Similarity of two profiles from different roads

2.3 基于富集因子分析的道路降尘中元素的来源

富集因子法常被用来分析元素来源^[19]。它在应用过程中存在着一定的不确定性, 比如参比系统和参比元素的不同, 会直接影响结果^[20]。但是, 鉴于该方法目前被较多应用, 并能在一定程度上帮助诊断元素的污染程度和来源。因此, 为探究道路降

尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素的富集程度, 并判断其可能的自然和人为来源^[21], 本文选用富集因子法对其进行分析, 其计算公式^[22]为:

$$EF = \frac{(c_i/c_r)_{\text{道路降尘}}}{(c_i/c_r)_{\text{土壤}}} \quad (2)$$

式中, c_i 是所研究的第 i 种元素的浓度; c_r 为选定

的参比元素的浓度;下标“道路降尘”表示在道路降尘中的含量,下标“土壤”表示在土壤背景参考系统中元素的含量.根据富集因子的大小,可将元素的富集(污染)程度分为6个级别.其中,污染级别越高表明受到人类活动的影响越大,详见表1.

参比元素主要有 Al、Fe、Ti、Sc、Si,其中,在地壳中化学性质较稳定、分析精度较高、使用最广泛的参比元素为 Al^[23,24],因此本研究选取 Al 元素作为参比元素.利用公式(2)计算不同道路类型元素的富集

因子,结果见表2.其中,各元素在土壤中的含量选用天津 A 层土壤元素背景值(中位值)^[25].

表 1 富集因子分级

Table 1 Classes of the enrichment factors		
EF 值	富集程度	污染级别
<1	无富集	0
1~2	轻微富集	1
2~5	中度富集	2
5~20	显著富集	3
20~40	强烈富集	4
>40	极强富集	5

表 2 天津市道路降尘 PM_{2.5}和 PM₁₀中元素富集因子值

Table 2 Element enrichment factors of PM_{2.5} and PM₁₀ in Tianjin road dust fall

元素	PM _{2.5}				PM ₁₀			
	中位值	最大值	最小值	平均值	中位值	最大值	最小值	平均值
Cd	37.68	60.66	22.49	41.92	36.21	92.32	21.86	47.98
Cr	37.37	46.42	21.05	33.75	36.73	44.13	22.09	35.46
Zn	18.13	29.34	13.20	19.93	18.60	48.64	13.63	23.32
Cu	17.40	20.28	13.13	16.81	14.70	18.62	9.62	14.45
Pb	7.99	10.45	7.02	8.37	8.92	10.71	6.38	8.73
As	7.81	8.69	4.20	6.96	6.33	7.29	4.05	6.09
Ca	2.62	3.02	1.97	2.59	2.38	2.86	2.00	2.41
Mg	1.78	2.21	1.54	1.82	2.00	2.10	1.66	1.91
Ti	1.07	1.59	0.82	1.13	1.45	2.06	1.19	1.51
Fe	1.22	1.54	0.99	1.28	1.53	2.02	1.19	1.55
Mn	1.01	1.21	1.00	1.08	1.18	1.45	0.93	1.19
Ba	1.37	1.64	0.90	1.32	1.20	1.28	0.92	1.15
K	0.83	0.86	0.70	0.81	0.84	0.90	0.69	0.83
Na	0.78	0.83	0.60	0.76	0.71	0.81	0.64	0.73

表2表明,PM_{2.5}中Cd和Cr元素富集因子中位值分别为37.68和37.37,为强烈富集;Zn、Cu、Pb和As元素富集因子中位值5~20,为显著富集;Ca元素富集因子中位值2.62,为中度富集;Mg、Ti、Fe、Mn、Ba、K和Na元素富集因子中位值0~2,为轻微或无富集.PM₁₀中Cd和Cr元素富集因子中位值分别为36.21、36.73,为强烈富集;Zn、Cu、Pb和As元素富集因子中位值5~20,为显著富集;Ca和Mg元素富集因子中位值分别为2.38和2.00,为中度富集;Ti、Fe、Mn、Ba、K和Na元素富集因子中位值0~2,为轻微或无富集.

有研究表明^[26],Cd和Cr等重金属直接来源于机动车尾气和工业废气排放,受人为活动的影响较大.Zn元素主要来源于汽车尾气的排放和轮胎磨损^[27];Cu来源于柴油机或车辆制动器的磨损^[28];Pb是汽车尾气排放的示踪元素^[27],虽然我国于2000年开始无铅汽油的使用降低了机动车排放对颗粒物中Pb的贡献,但是机动车排放仍对Pb有贡献^[26];As为燃煤的指示元素.因此可以认为人为源对PM_{2.5}和PM₁₀的影响较大.Ca是建筑尘的标识

元素,在地壳中含量丰富,说明Ca元素除土壤来源外,还受到人类活动的影响.可见,元素Cd、Cr、Zn、Cu、Pb、As和Ca受到人为活动的影响较大,其余元素主要来源于自然源.

3 结论

(1)天津市道路降尘PM_{2.5}和PM₁₀中平均质量分数在1%~20%之间的元素从大到小依次为:Si>Al>Ca>Fe>Mg>K>Na;Si元素在PM_{2.5}和PM₁₀中的质量分数均最高.Na、Cu、Zn、As、Cd和Pb元素更易在PM_{2.5}上富集,K、Cr、Mn、Al、Mg和Ti元素更易在PM₁₀上富集.

(2)利用分歧系数对道路降尘PM_{2.5}和PM₁₀中元素的相似性进行定量分析可得,CD值为0.06,表明两种粒径的元素成分谱相似性较高.

(3)元素Cd和Cr为强烈富集;元素Zn、Cu、Pb和As这4种表现显著富集;Ca元素为中度富集;元素Mg、Ti、Fe、Mn、Ba、K和Na为轻微富集或无富集.元素Cd、Cr、Zn、Cu、Pb、As和Ca受人活动的影 响较大,其余元素主要来源于自然源.

(4)综合道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素质量分数和富集因子分析结果可知,天津市道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中污染元素主要来源于土壤风沙尘、建筑尘、交通尘(汽车尾气的排放、轮胎磨损和刹车片磨损)和煤烟尘。

参考文献:

- [1] 樊守彬,田刚,李钢,等.北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J].环境科学,2007,28(10):2396-2399.
Fan S B, Tian G, Li G, *et al.* Emission characteristics of paved roads fugitive dust in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, 28(10): 2396-2399.
- [2] 张伟,姬亚芹,李树立,等.天津市春季样方法道路扬尘 $PM_{2.5}$ 粒度乘数特征[J].中国环境科学,2016,36(7):1955-1959.
Zhang W, Ji Y Q, Li S L, *et al.* $PM_{2.5}$ size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 1955-1959.
- [3] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(2): 951-972.
- [4] Censi P, Zuddas P, Randazzo L A, *et al.* Source and nature of inhaled atmospheric dust from trace element analyses of human bronchial fluids[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(15): 6262-6267.
- [5] Li H M, Wang Q G, Yang M, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ aerosols in a megacity of Southeast China[J]. Atmospheric Research, 2016, 181: 288-299.
- [6] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 712-723.
- [7] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, *et al.* Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses[J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 636-642.
- [8] Modaihsh A S, Mahjou M O. Falling dust characteristics in Riyadh City, Saudi Arabia during winter months[J]. APCBEE Procedia, 2013, 5: 50-58.
- [9] Shen Z X, Sun J, Cao J J, *et al.* Chemical profiles of urban fugitive dust $PM_{2.5}$ samples in Northern Chinese cities[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 619-626.
- [10] 梁俊宁,刘杰,陈洁,等.陕西西部某工业园区采暖期大气降尘重金属特征[J].环境科学学报,2014,34(2):318-324.
Liang J N, Liu J, Chen J, *et al.* Characteristics of heavy metals in atmospheric deposition in heating periods of an industrial park in Western Shaanxi Province, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 318-324.
- [11] 熊秋林,赵文吉,郭道宇,等.北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析[J].环境科学,2015,36(8):2735-2742.
Xiong Q L, Zhao W J, Guo X Y, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of dustfall trace elements during winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2735-2742.
- [12] 李树立,姬亚芹,朱振宇,等.天津市秋季道路降尘分布特征[J].环境污染与防治,2015,37(11):52-55.
Li S L, Ji Y Q, Zhu Z Y, *et al.* Distribution characteristics of road dust fall during autumn in Tianjin[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(11): 52-55.
- [13] 陈魁,白志鹏.颗粒物再悬浮采样器研制与应用[J].环境工程,2006,24(5):67-68,81.
Chen K, Bai Z P. Development and use of sampler for resuspended particulates[J]. Environmental Engineering, 2006, 24(5): 67-68, 81.
- [14] 肖致美,毕晓辉,冯银厂,等.宁波市环境空气中 PM_{10} 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 PM_{10} and $PM_{2.5}$ in urban area of Ningbo City[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(5): 549-555.
- [15] 张灿,周志恩,翟崇治,等.基于重庆本地碳成分谱的 $PM_{2.5}$ 碳组分来源分析[J].环境科学,2014,35(3):810-819.
Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Carbon source apportionment of $PM_{2.5}$ in Chongqing based on local carbon profiles[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 810-819.
- [16] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of $PM_{2.5}$ ambient aerosol chemical databases[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(S1): S115-S116.
- [17] Hwang I, Hopke P K, Pinto J P. Source apportionment and spatial distributions of coarse particles during the regional air pollution study[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(10): 3524-3530.
- [18] 姬亚芹.城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D].天津:南开大学,2006.
Ji Y Q. Study on the soil dust profiles for source apportionment of ambient particulate matter[D]. Tianjin: Nankai University, 2006.
- [19] Duce R A, Hoffman G L, Zoller W H. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? [J]. Science, 1975, 187(4171): 59-61.
- [20] 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.
- [21] Pan Y P, Tian S L, Li X R, *et al.* Trace elements in particulate matter from metropolitan regions of Northern China: Sources, concentrations and size distributions[J]. Science of the Total Environment, 2015, 537: 9-22.
- [22] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, 183(4121): 198-200.
- [23] 王嘉珺,赵雪艳,姬亚芹,等.抚顺市 PM_{10} 中元素分布特征及来源分析[J].中国环境监测,2012,28(4):107-113.
Wang J J, Zhao X Y, Ji Y Q, *et al.* Elemental characteristics and source apportionment of PM_{10} in Fushun[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(4): 107-113.
- [24] 栾孟孝,姬亚芹,王伟,等.鞍山市秋季大气 $PM_{2.5}$ 中元素污

- 染特征和来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(10): 2197-2203.
- Luan M X, Ji Y Q, Wang W, *et al.* Characteristic and sources of the polluted elements in PM_{2.5} during autumn of Anshan[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(10): 2197-2203.
- [25] 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.
- China National Environmental Monitoring Center. The soil background value in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [26] 李佳琦, 吴烨, 宋少洁, 等. 北京道路交通环境亚微米颗粒物元素组成特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 49-55.
- Li J Q, Wu Y, Song S J, *et al.* Characteristics and source apportionment of elements in submicron particulate matter near an urban freeway in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 49-55.
- [27] 戴树桂, 朱坦, 曾幼生, 等. 天津市区采暖期飘尘来源的解析[J]. 中国环境科学, 1986, 6(4): 24-30.
- Dai S G, Zhu T, Zeng Y S, *et al.* Source apportionment for Tianjin urban aerosol in heating season[J]. China Environmental Science, 1986, 6(4): 24-30.
- [28] Vallius M, Lanki T, Tiittanen P, *et al.* Source apportionment of urban ambient PM_{2.5} in two successive measurement campaigns in Helsinki, Finland[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(5): 615-623.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓名列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocculation-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)