

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

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

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

基于样方法的天津市春季道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子特征及来源解析

赵静琦, 姬亚芹*, 张蕾, 王士宝, 李越洋

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 为研究天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及其来源, 于 2015 年 4 月采集天津市道路扬尘样品, 利用再悬浮采样器将采集的样品悬浮到滤膜上, 用离子色谱仪分析其水溶性无机离子组分, 利用相关分析和比值分析及主成分法对其污染特征和来源进行探讨. 结果表明, 天津市 8 种水溶性无机离子占道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的 $6.13\% \pm 2.32\%$; 不同道路类型道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子总量差异较大. 相关性分析表明 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 这 4 种离子同源性较高. $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值显示固定源对天津市春季道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响更为显著. 通过主成分分析法可知, 天津市春季道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于燃煤源、移动源、生物质燃烧源和建筑施工扬尘.

关键词: 天津市; 道路扬尘; $\text{PM}_{2.5}$; 水溶性无机离子; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-1994-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201710092

Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $\text{PM}_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrant Sampling Method

ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin*, ZHANG Lei, WANG Shi-bao, LI Yue-yang

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

Abstract: In order to collect comprehensive information regarding the characteristics and sources of the water-soluble inorganic ions in road dust (RD) $\text{PM}_{2.5}$ in Tianjin, samples of road dust were collected in April 2015 in Tianjin, and then re-suspended on filters using a NK-ZXF sampler. The concentrations of the major water-soluble inorganic ions were analyzed by ion chromatography. A correlation analysis, ratio method, and principal component analysis were used to analyze the sources of RD $\text{PM}_{2.5}$. The results showed that the total water-soluble inorganic ion concentration in Tianjin accounted for $6.13\% \pm 2.32\%$, varying with different road types. Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} showed high homology. $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ revealed that the main source of $\text{PM}_{2.5}$ was mostly attributed to fixed sources. The principal component analysis showed that the main sources of RD $\text{PM}_{2.5}$ in Tianjin were coal combustion, mobile sources, biomass burning, and construction dust.

Key words: Tianjin; road dust; $\text{PM}_{2.5}$; water-soluble inorganic ions; source apportionment

大气中的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)是影响环境空气质量的首要污染物^[1], 在全球气候变化^[2], 人类健康问题^[3]和大气能见度^[4]方面起着重要的作用. 水溶性无机离子是大气颗粒物中的主要成分, 具有较强的亲水性和吸湿性, 影响降水酸度^[5,6], 对散射系数和能见度有较大影响^[7]. 因此, 分析大气颗粒物中的水溶性无机离子, 对于研究颗粒物的来源及其对环境的影响具有十分重要的意义.

随着我国对工业源和建筑施工及堆场等开放源排放的控制不断加强, 与此同时, 我国城市经济快速发展, 交通建设不断加快, 机动车保有量逐年上升, 道路交通扬尘的排放量及其对空气颗粒物的贡献率呈现不断增加的趋势. 研究表明, 道路交通扬尘是城市空气颗粒物污染的重要来源之一^[8,9]. 控制城市道路交通扬尘成为改善城市空气质量的关键步骤.

以往对于大气颗粒物的研究主要集中于颗粒物污染的总体水平^[10~12], 鲜见关于道路交通扬尘这一单一源类化学组分的研究. 与其它类型污染源相比, 道路扬尘的来源更复杂、影响范围更大. 由于自然及人力作用, 道路扬尘往往会反复沉降与扬起, 造成重复污染, 且道路扬尘的排放高度较低, 并多集中于人群密集的场所, 因此对环境空气质量及人体健康的危害更大^[13].

为探究天津市道路扬尘中水溶性无机离子组分特征及来源, 本研究选取了天津市 11 个典型道路路段, 通过样方吸尘法采集道路扬尘并对其 $\text{PM}_{2.5}$

收稿日期: 2017-10-13; 修订日期: 2017-11-07

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409004); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0201)

作者简介: 赵静琦(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染控制, E-mail: 1442073606@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiyiqin@nankai.edu.cn

离子组分分析，以期为天津市道路扬尘的防治工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

根据 CJJ 37-2016《城市道路设计规范》，将天津市道路划分为主干道、次干道、支路、快速路和环线 5 种类型。每种类型选取 2~3 个共 11 个典型道路路段设置采样点，具体见表 1。在每个路段两侧分别设置 4 个采样点，每个采样点在机动车道慢车道和非机动车道各采集一个道路扬尘样品，共计 176 个样品。采样点间隔一般 800 m，采样点位尽量避开公交站、路口等人流密集处。采样时间为 2015 年 4 月，为天津市春季的典型月份。采样时用真空吸尘器吸扫路面积尘，机动车道采集 4 m^2 ，非机动车道采集 2 m^2 ，用吸尘器在采样区域内横纵方向各吸 2 遍，速度约 $1\sim2\text{ min}\cdot\text{m}^{-2}$ 。采样完毕后，用细毛刷将集尘盒内的尘土扫入样品袋内，编号保存。将送回实验室的样品放置到干燥器中平衡干燥 3 d，之后将其通过 20 目和 200 目泰勒标准筛进行筛分处理，过筛后的道路扬尘样品按车道合并，通过 NK-ZXF 再悬浮装置悬浮到石英膜上。

表 1 采样道路信息

Table 1 Information for the sampled roads

道路名称	道路类型	道路走向
卫津路	主干道	南北走向
复康路	主干道	东西走向
黄河道	次干道	东西走向
鞍山西道	次干道	东西走向
南开二纬路(包括西市大街)	支路	东西走向
白堤路	支路	南北走向
迎水道	支路	东西走向
密云路	快速路	南北走向
红旗南路	快速路	东西走向
外环线西路 1	外环线	南北走向
外环线西路 2	外环线	南北走向

1.2 样品分析

本研究用美国戴安公司的 ICS3000 型离子色谱仪对样品中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 进行定量分析。将 1/8 石英膜样品浸泡在 8.00 mL 去离子水中，置于超声波浴下提取 15 min，静置后取上清液进行离子色谱分析。

1.3 质量控制

使用前将空白滤膜在马弗炉中 600°C 下灼烧 3 h，以去除杂质。再悬浮前后分别将石英滤膜在恒温恒湿的天平室内平衡 72 h，以降低湿度、温度对

称重的影响。样品分析过程中，测量误差在 10% 以内，阴离子、阳离子的平均相对标准偏差分别为 3.0% 和 4.0%。每测定 10 个样品，进行一次单点校准和空白测定，所有检测结果均满足质控要求。

2 结果与讨论

2.1 道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分含量水平

天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子所占质量分数如图 1 所示。天津市 8 种水溶性无机离子占道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的 $6.13\% \pm 2.32\%$ ，各水溶性无机离子质量分数大小顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ ，其中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量均高于 1%，分别占道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的 $2.19\% \pm 1.96\%$ 、 $1.67\% \pm 0.52\%$ ，同时，分别占离子总量的 35.74% 和 27.18%。

表 2 为我国部分北方城市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子的质量分数水平。与石家庄市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子^[14]相比，本研究中天津市离子总量及 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量分数均较低，与鞍山市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子^[15]相比，除 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 较高外，其余离子的质量分数均较低，与盘锦市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子^[15]相比，除 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 较低外，其余离子的质量分数均较高， SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的质量分数与北京^[16]相近。出现这些差异的原因可能与不同城市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染源不同有关。

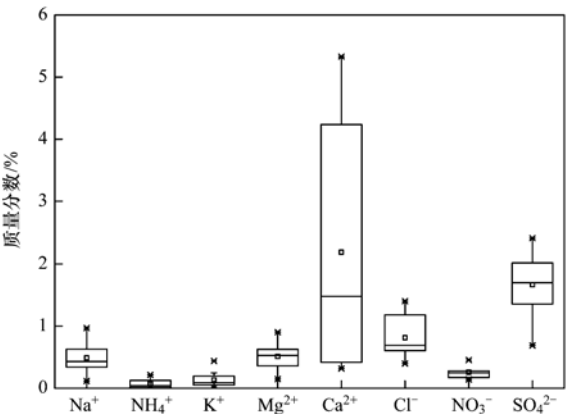


图 1 天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子的质量分数

Fig. 1 Percentage of water-soluble inorganic ions in road dust $\text{PM}_{2.5}$ in Tianjin City

天津市主干道、次干道、支路、快速路和外环线道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子质量分数水平如表 3 所示。可以看出，不同道路类型道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子总量差异较大，总体表现

表 2 不同城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子质量分数/%

Table 2 Percentage of water-soluble inorganic ions in road dust $PM_{2.5}$ from different cities/%										
城市	观测时间(年-月)	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	总计
天津市	2015-04	0.49	0.07	0.13	0.51	2.19	0.81	0.26	1.67	6.13
北京市 ^[16]	—	—	0.005	—	—	—	0.714	0.318	2.148	8.8
石家庄市 ^[14]	2013-05	2.594	—	1.310	0.500	11.74	1.321	1.532	3.102	22.1
鞍山市 ^[15]	2014-09	2.53	0.26	0.20	0.09	0.70	2.08	1.43	1.96	5.84
盘锦市 ^[15]	2016-05 ~ 2016-07	0.52	0.95	0.08	0.29	2.91	0.31	0.22	0.56	5.83

为:外环线 > 快速路 > 支路 > 主干道 > 次干道, 分别占道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的 9.39%、6.27%、5.13%、4.98% 和 3.94%, 这与道路的车流量、车辆行驶状况、清扫频次以及车辆遗撒等有关. 由图 2 可知, 外环线和快速路中, Ca^{2+} 在总离子中的质量分数最高, 其次为 SO_4^{2-} ; 主干道中 SO_4^{2-} 占 $PM_{2.5}$ 的质量分数最高, 其次为 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 NO_3^- ; 次干道和支路 SO_4^{2-} 占 $PM_{2.5}$ 的质量分数最高, 其次为 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ . Ca^{2+} 在 5 种道路类型中差异最大, 最大值与最小值之比为 12.35, 其次是 NH_4^+ 和 K^+ . Ca^{2+} 主要来源于土壤扬尘、建筑施工扬尘等污染源. 外环线和快速路中 Ca^{2+} 的质量分数明显高于其他道路类型. 这与外环线上大量重型车辆通行带来

的道路磨损和渣土运输车辆遗撒有关, 且天津市外环线道路两侧多为绿地和裸露地面, 存在风蚀起尘现象, 因此道路扬尘在一定程度上受到土壤扬尘成分影响. 快速路上通行的车辆车速较快, 道路遗撒现象也较为严重, 因而 Ca^{2+} 质量分数也较高. 天津市支路周边环境较为复杂, 车辆行驶状态多样且道路扬尘来源复杂, 导致支路道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中离子总量高于主干道和次干道. 除 NH_4^+ 外, 次干道道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中其他离子质量分数均小于支路, 相比于支路, 次干道上车流量大, 车速较快, 车辆行驶过程中易使地面积尘扬起, 且次干道上清扫和洒水频次较高, 路面较为清洁, 因而水溶性无机离子总量较低.

表 3 不同道路类型水溶性无机离子质量分数/%

Table 3 Percentage of water-soluble inorganic ions for different types of roads/%									
项目	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	离子和
主干道	0.23	0.06	0.03	0.23	1.22	0.92	0.27	2.02	4.98
次干道	0.48	0.04	0.15	0.40	0.39	0.67	0.24	1.56	3.94
支路	0.60	0.02	0.23	0.65	0.61	0.83	0.28	1.92	5.13
快速路	0.57	0.18	0.14	0.48	3.47	0.41	0.17	0.83	6.27
外环线	0.50	0.07	0.08	0.65	4.77	1.09	0.29	1.80	9.39
平均值	0.49	0.07	0.13	0.51	2.19	0.81	0.26	1.67	6.13
标准偏差	0.23	0.07	0.12	0.21	1.96	0.34	0.10	0.52	2.32
最大值比	2.60	8.38	6.88	2.76	12.35	2.66	1.69	2.42	2.34

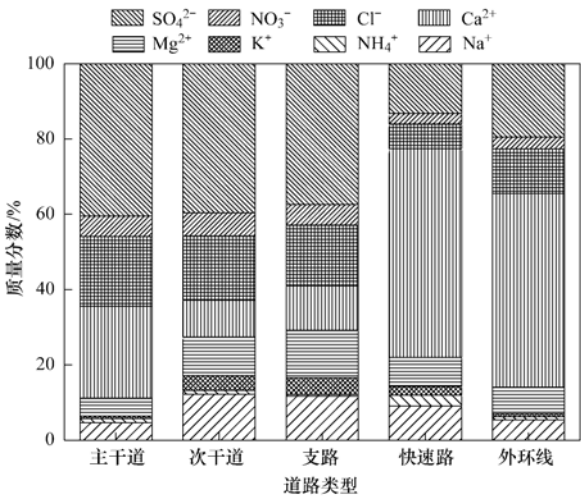


图 2 8 种水溶性无机离子在总离子中质量分数对比

Fig. 2 Comparison of the percentage of the water-soluble inorganic ions in the total ions

2.2 主要离子间的相关性分析

水溶性无机离子间的相关关系可以反映其来源的相似程度及离子的存在形式^[17], 本研究运用 SPSS 22.0 软件对天津市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子进行斯皮尔曼相关分析, 其相关系数矩阵见表 4. 从中可知, NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 相关性较好, 相关系数为 0.754, 且通过了显著性检验, 而 NH_4^+ 与 NO_3^- 相关性则相对较差, 由此可以初步判断 NH_4^+ 与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的结合方式, 初步推断 NH_4^+ 主要与 SO_4^{2-} 结合. Na^+ 与 K^+ 、 Mg^{2+} 的相关系数分别为 0.839 和 0.815, Mg^{2+} 与 K^+ 、 Ca^{2+} 的相关系数分别为 0.830 和 0.828, 说明这 4 种离子同源性较高, 其中, Na^+ 主要来源于土壤源与海洋源, Ca^{2+} 主要来自土壤扬尘及建筑施工扬尘等污染源, Mg^{2+} 来自

土壤扬尘和海洋源^[18]，K⁺ 主要来源于生物质燃烧源、燃煤与燃油以及海洋源等^[19]，由此可以初步推断 Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 和 Mg²⁺ 的来源同为自然源。此外，Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的相关系数为 0.870，表明二者具有较为相似的来源，SO₄²⁻ 主要来源于燃煤排放^[16]，王毓秀等^[20] 的研究表明 Cl⁻ 是燃煤烟尘的主要组分之一，推测 Cl⁻ 除来自海洋源外，还有一部分来源于燃煤。

表 4 8 种水溶性无机离子相关系数¹⁾

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	1.000							
NH ₄ ⁺	-0.124	1.000						
K ⁺	0.839 **	-0.105	1.000					
Mg ²⁺	0.815 **	-0.123	0.830 **	1.000				
Ca ²⁺	0.633 **	0.173	0.507 **	0.828 **	1.000			
Cl ⁻	0.368	0.552 **	-0.093	0.533 **	0.472 *	1.000		
NO ₃ ⁻	-0.099	0.380	-0.211	-0.119	-0.087	0.719 **	1.000	
SO ₄ ²⁻	0.354	0.754 **	0.376	0.481 *	0.344	0.870 **	0.623 **	1.000

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 主要由人为排放的 SO₂、NO_x 和 NH₃ 经二次转化产生^[21]，是导致颗粒物形成的重要物质^[22]。天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的相关系数分别为 0.754 和 0.380，表明 NH₄⁺ 与 NO₃⁻ 相关性较差、与 SO₄²⁻ 相关性则相对较好。如果 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 全部结合成 (NH₄)₂SO₄，则 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 物质的量之比为 2:1；如果全部结合成 NH₄HSO₄，则 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 物质的量之比为 1:1。天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 物质的量之比为 0.22，NH₄⁺ 与 NO₃⁻ 物质的量之比为 0.94，表明 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的主要结合方式为 NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃。图 2 表明，天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 的质量分数远小于 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的质量分数，这表明 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 除与 NH₄⁺ 结合外，还与其他阳离子结合。

SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 作为重要的二次气溶胶粒子，在一定程度上可以反映人类活动对大气环境的影响。其中，SO₄²⁻ 主要来自于燃煤产生的 SO₂，多为固定源排放；而 NO₃⁻ 主要来自于石油、天然气等化石燃料的燃烧，多为移动源排放^[23]。因此，一般用 NO₃⁻/SO₄²⁻ 质量浓度的比值来表示移动源和固定源对大气颗粒物贡献程度的相对大小^[24,25]。天津市春季道路扬尘 PM_{2.5} 中 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的均值为 0.15，与北京市^[16] 的 0.15 持平，低于石家庄市^[14] (0.49)，由此可见天津市道路扬尘 PM_{2.5} 的 NO₃⁻/SO₄²⁻ 处于较低水平，固定源排放对其影响更为显著，但随着城市化进程加快，机动车保有量不断增长，移动源对大气质量的影响也不容忽视。

2.3 道路扬尘 PM_{2.5} 来源解析

PCA 是一种用较少的几个有代表性的因子来说明众多变量，并依据标识组分识别污染源的方法。本研究采用 SPSS 22.0 软件进行主成分分析来解析天津市道路扬尘 PM_{2.5} 来源，主成分特征值、贡献率及旋转因子载荷矩阵见表 5。

表 5 主成分特征值、贡献率及旋转因子载荷矩阵
Table 5 Eigenvalue and contribution rates of major components and rotated component matrix

项目	因子 1	因子 2	因子 3
SO ₄ ²⁻	0.955	-0.511	0.103
Cl ⁻	0.826	-0.557	0.377
NO ₃ ⁻	0.809	-0.297	0.112
Mg ²⁺	0.660	0.633	0.201
Na ⁺	0.605	0.779	0.113
K ⁺	0.641	0.843	-0.372
NH ₄ ⁺	0.541	-0.565	-0.307
Ca ²⁺	0.109	0.197	0.933
特征值	3.106	2.440	1.312
贡献率/%	38.828	30.506	16.399

由表 5 可知，第一个主成分的特征值为 3.106，贡献率为 38.828%，第二个主成分的特征值为 2.440，贡献率为 30.506%，第三个主成分的特征值为 1.312，贡献率为 16.399%，前 3 个主成分的贡献率已经达到 85.732%，说明前 3 个主成分已经能够提供原始数据的足够信息。主成分 1 主要与 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 NO₃⁻ 等离子的相关性较强，载荷因子分别为 0.955、0.826 和 0.809，因此主成分 1 表征燃煤源和移动源的混合源；主成分 2 主要与 K⁺ 的相关性较强，载荷因子为 0.843，K⁺ 主要来源于生物质燃烧源，因此主成分 2 表征生物质燃烧源；主

成分3 主要与 Ca^{2+} 有关, Ca^{2+} 主要来源于建筑施工扬尘, 因此主成分3 表征建筑施工扬尘. 可知, 天津市春季道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于燃煤源、移动源、生物质燃烧源和建筑施工扬尘.

3 结论

(1) 天津市 8 种水溶性无机离子占道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的 $6.13\% \pm 2.32\%$, 各水溶性无机离子质量分数大小顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$. 不同道路类型道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子总量差异较大, 总体表现为: 外环线 > 快速路 > 支路 > 主干道 > 次干道.

(2) 相关分析表明, Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 这 4 种离子相关性较好, 4 种离子同源性较高; Cl^- 和 SO_4^{2-} 的相关系数为 0.870, 说明 Cl^- 除来自海洋源外, 还有一部分来源于燃煤.

(3) 天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 相关性较好, 与 NO_3^- 相关性则相对较差; 且 NH_4^+ 的质量分数远小于 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , 这表明 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 除与 NH_4^+ 结合外, 还与其他阳离子结合.

(4) 天津市春季道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 处于较低水平, 固定源排放对其的影响更为显著.

(5) 主成分分析表明, 天津市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于燃煤源、移动源、生物质燃烧源和建筑施工扬尘.

参考文献:

- [1] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al.* Winter and summer $\text{PM}_{2.5}$ chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(10): 1214-1226.
- [2] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5380-5552.
- [3] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [4] Shen G F, Xue M, Yuan S Y, *et al.* Chemical compositions and reconstructed light extinction coefficients of particulate matter in a mega-city in the western Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 14-20.
- [5] Li Y C, Yu J Z. Composition profile of oxygenated organic compounds and inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ in Hong Kong [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **7**(4): 338-349.
- [6] Andreae M O, Schmid O, Yang H, *et al.* Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6335-6350.
- [7] 陶俊, 张仁健, 董林, 等. 夏季广州城区细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 中水溶性无机离子特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1417-1424.
- [8] Tao J, Zhang R J, Dong L, *et al.* Characterization of water-soluble inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{1.0}$ in summer in Guangzhou[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1417-1424.
- [9] 刘泽常, 张猛, 郝长瑞, 等. 济南市道路扬尘排放因子估算及其影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(1): 150-154.
- [10] Liu Z C, Zhang M, Hao C R, *et al.* Road dust emission factors in Jinan City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(1): 150-154.
- [11] 杨德容, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市铺装道路扬尘排放清单及空间分布特征研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(11): 83-87.
- [12] Yang D R, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Emission inventory and spatial distribution of paved road fugitive dust in Chengdu in Sichuan province [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(11): 83-87.
- [13] Li H M, Wang Q G, Yang M, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ aerosols in a megacity of Southeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 288-299.
- [14] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [15] Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of $\text{PM}_{2.5}$ in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [16] 张伟, 姬亚芹, 李金, 等. 鞍山市夏冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分化学特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1657-1662.
- [17] Zhang W, Ji Y Q, Li J, *et al.* The characteristics and source apportionment of carbon fractions in $\text{PM}_{2.5}$ during summer-winter period in Anshan City [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1657-1662.
- [18] 刘玉燕, 王玉杰. 干旱区气候条件对道路灰尘及土壤 Pd、Rh 累积的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1528-1532.
- [19] Liu Y Y, Wang Y J. Effect of climate conditions in arid area on accumulation of Pd, Rh in dust and soil from road environment [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1528-1532.
- [20] 张涛, 孙彦敏. 石家庄市城市道路扬尘成分谱及特征分析[J]. *河北工业科技*, 2017, **34**(2): 150-154.
- [21] Zhang T, Sun Y M. Component spectrum and emission characteristic analysis of the urban road dust in Shijiazhuang City [J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2017, **34**(2): 150-154.
- [22] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁典型城市道路扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4951-4957.
- [23] Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust $\text{PM}_{2.5}$ in selected cities in Liaoning Province [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4951-4957.
- [24] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 $\text{PM}_{2.5}$ 成分谱研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 4043-4052.

- Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ profiles of typical sources in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35** (12): 4043-4052.
- [17] 蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 等. 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征[J]. *环境科学*, 2016, **37** (8): 2863-2870.
- Jiang Y, He G Y, Luo B, *et al.* Pollution characteristics of inorganic water-soluble ions in atmospheric particulate matter in Chengdu plain [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (8): 2863-2870.
- [18] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35** (5): 1633-1643.
- Xue G Q, Zhu B, Wang H L. Size distributions and source apportionment of soluble ions in aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (5): 1633-1643.
- [19] 陈永桥, 张逸, 张晓山. 北京城乡结合部气溶胶中水溶性离子粒径分布和季节变化[J]. *生态学报*, 2005, **25** (12): 3231-3236.
- Chen Y Q, Zhang Y, Zhang X S. Size distribution and seasonal variation of ions in aerosol at semi-urban site in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25** (12): 3231-3236.
- [20] 王毓秀, 彭林, 王燕, 等. 电厂燃煤烟尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分特征[J]. *环境科学*, 2016, **37** (1): 60-65.
- Wang Y X, Peng L, Wang Y, *et al.* Characteristics of chemical components in $\text{PM}_{2.5}$ from the coal dust of power plants [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (1): 60-65.
- [21] 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 等. 2015 年北京城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及前体气体的污染特征[J]. *环境科学*, 2017, **38** (4): 1307-1316.
- Ding M M, Zhou J N, Liu B X, *et al.* Pollution characteristics of NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} in $\text{PM}_{2.5}$ and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (4): 1307-1316.
- [22] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, **34** (1): 60-69.
- Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34** (1): 60-69.
- [23] Calvert J G, Stockwell W R. Mechanism and rates of the gas phase oxidations of sulfur dioxide and the nitrogen oxides in the atmosphere[R]. Ohio State, USA: Ohio State University, 1983.
- [24] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (21): 3771-3784.
- [25] 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.
- Zhao P S, Zhang X L, Meng W, *et al.* Characteristics of inorganic water-soluble ions from aerosols in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (6): 1546-1549.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)