Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.7
第41卷 第7期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第7期
2020年7月15日

目 次

中国钢铁行业大气环境影响 …… 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆(2981)
华北地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 …… 杨伟, 姜晓丽(2995)
郑州市民运会期间大气 $PM_{2.5}$ 改善效果评估 …… 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹(3004)
成都夏冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征 …… 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强(3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 …… 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈(3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 …… 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波(3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱 …… 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文虢(3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估 …… 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟(3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 …… 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林(3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽(3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性 …… 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音(3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 …… 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霆(3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 …… 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳(3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 …… 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜(3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO_x 排放特征对比分析 …… 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博(3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 …… 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫(3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 …… 魏文俊, 王兵, 牛香(3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 …… 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成(3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 …… 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰(3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析 …… 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙(3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 …… 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾(3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 …… 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发(3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 …… 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳(3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 …… 张慧, 王世亮, 余杨(3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 …… 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪(3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 …… 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英(3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律 …… 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡(3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征 …… 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠(3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 …… 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华(3249)
海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 …… 王娜, 赵卫红, 苗辉(3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 …… 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟(3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 …… 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃(3275)
分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 …… 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容(3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 …… 毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁(3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 …… 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁(3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 …… 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜(3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe^0/WMF)对水中Cr(Ⅵ)的去除特性及机制 … 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉(3326)
一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 …… 廖丹雪, 单慧媚, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽(3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征 …… 王晓曈, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍(3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 …… 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 …… 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏鹏, 方芳, 陈猷鹏(3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 …… 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻(3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 …… 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎(3384)
城镇河流 CO_2 及 CH_4 排放与市政排水管网污水输入的关联影响 …… 李磊, 陈浩, 朱弈, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建锋(3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N_2O 排放的影响 …… 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林(3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 …… 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠(3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异 …… 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波(3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响 …… 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵(3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 …… 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋(3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 …… 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波(3441)
《环境科学》征订启事(3011) 《环境科学》征稿简则(3084) 信息(3174, 3185, 3391)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第7期 2020年7月
Vol.41, No.7 Jul., 2020

邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别

宋怡, 卢新卫*, 周潇, 葛子赫
(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 为探究工业企业转型城市的道路可悬浮灰尘中重金属的来源特征,在邢台市区采集50份道路灰尘样品,利用X-Ray荧光光谱仪测定可悬浮灰尘中Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As和Pb的含量,采用富集因子法评价重金属的污染水平,利用相关分析、主成分分析和聚类分析判别重金属之间的关系,识别其可能来源. 结果表明,Co、Cu、Zn和Pb的平均含量是其相应河北省土壤背景值的2倍以上. 富集因子评价结果显示,邢台市道路可悬浮灰尘中Co、Cu、Zn和Pb整体呈现中度富集,Ni、As、Cr和Mn无富集或轻微富集. 综合样品中各重金属元素的含量特征与多元统计分析结果,邢台市区道路可悬浮灰尘中Cr、Mn和Ni主要来源于自然和工业混合源,Zn、Pb和Cu来源于交通和燃煤源,As来源于自然源,Co主要受工业活动的影响.

关键词:重金属; 污染特征; 来源识别; 可悬浮灰尘; 邢台市
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)07-3130-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201912153

Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City

SONG Yi, LU Xin-wei*, ZHOU Xiao, GE Zi-he
(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Fifty dust samples were collected from Xingtai City to study the source characteristics of heavy metals in suspended particles of urban road dust from industrial enterprise transformation cities. The contents of Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, and Pb in particles of urban road dust smaller than 100 μm were determined by X-ray fluorescence spectrometry, and their pollution levels were assessed by enrichment factor. The possible sources of heavy metals measured in the dust were identified by multivariate statistical analysis methods including correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. The results indicated that in comparison to the element background values of local soil, the particles of urban road dust smaller than 100 μm from Xingtai City had higher Cr, Mn, Co, Cu, Zn, and Pb concentrations. The accumulation level of Co was the highest, followed by Zn, and Pb and Cu, whereas the other trace metals were deficient or showed minimal enrichment in the suspended road dust. The multivariate statistical analysis results showed that Cr, Mn, and Ni had significant positive correlation. These metals belong to both a principal component and a cluster, whereas Cu, Zn, and Pb belong to just a principal component. Considering the content characteristics and the results of multivariate statistical analysis of various heavy metal elements in the suspended samples, these results illustrated that the Cr, Mn, and Ni in the suspended particles of urban dust from Xingtai City roads mainly come from natural and industrial sources, whereas the Zn, Pb, and Cu originate from transportation and coal sources; As comes from natural sources, and Co is mainly affected by industrial activities.

Key words: heavy metal; pollution characteristics; source identification; suspended dust; Xingtai City

城市道路灰尘作为城市环境介质,受城市发展需要与人类行为轨迹的强烈影响,累积吸附了大量有毒害作用的物质,如重金属和PAHs[1~4]. 吸附在灰尘颗粒表面的重金属由于其富集性和不可降解性,往往危害人体健康和城市生态环境[5~7]. 作为重金属等众多污染物的载体,城市道路灰尘重金属污染已引起了人们的广泛关注[8~13]. 在城市道路灰尘中,粒径小于100 μm的微粒即可悬浮灰尘由于具有较大的比表面积,更容易富集重金属等污染物[14,15]. 与粗颗粒道路灰尘相比,道路可悬浮灰尘在人为活动或自然因素作用下易于扬起、悬浮进入空气中,实现长距离的搬运[6],从而影响大气环境质量和危害人体健康[16,17]. 因此,研究城市道路可悬浮灰尘重金属污染对于城市环境保护及居民健康防护而言更为重要.

邢台市是河北省典型的工业城市,也是河北省重要的煤炭钢铁能源基地. 邢台市在2013年环境保护部首次公布的74个城市质量排名中为倒数第一,截至采样期间,邢台市空气质量排名仍处于全国后10位. 邢台市道路可悬浮灰尘中重金属污染的研究在目前的文献中未见报道. 本研究的主要目的是探究邢台市道路可悬浮灰尘(粒径 <100 μm)中重金属Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As和Pb的含量、富集特征及来源,以期为邢台市环境现状评价及污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

邢台市(N36°50′~37°47′,E113°52′~115°49′)位于河北省南部,地势西高东低,西依太行山与山西

收稿日期: 2019-12-19; **修订日期**: 2020-02-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510)
作者简介: 宋怡(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染诊断与修复,E-mail: son@snnu.edu.cn
* 通信作者,E-mail:luxinwei@snnu.edu.cn

省毗邻，东邻京杭大运河与山东省相望，是京津冀城市群的重要节点城市，也是河北省重要的煤炭钢铁能源基地. 邢台市属暖温带亚湿润季风气候，年平均降水量 500.4 mm. 全市面积 1.25 万 km^2，市区人口 788 万人. 2018 年邢台市桥东区和桥西区完成气代煤、电代煤改造任务. 2019 年上半年，邢台市规模以上工业企业综合能源消费量 621.7 万 t. 2018 年邢台市民用汽车保有量 118.3 万辆.

1.2　样品采集与处理

2018 年 1 月 25 日至 2 月 20 日，连续 10 d 不降水的条件下，在邢台市桥西区和桥东区（图 1）不透水道路按照道路密度采集灰尘样品 50 个. 每个采样点用尼龙毛刷扫取重约 200 g 的混合样品编号带回实验室，将采集的灰尘样品风干且剔除杂质后取出约 50 g 过 150 目（100 μm）的尼龙筛待分析.

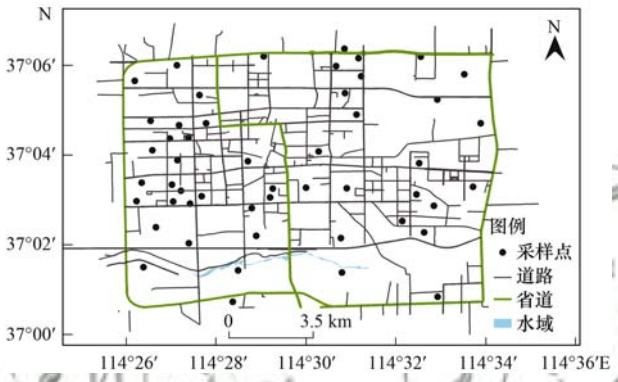

图 1　邢台市道路灰尘采样点示意

Fig. 1　Sketch map of road dust sampling sites in Xingtai City

1.3　样品分析与质量控制

将筛选出来的可悬浮灰尘用振动磨研磨，使其粒径小于 200 目，压片后利用 X-荧光光谱仪分析灰尘样品中 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 等 8 种重金属元素含量，在实验分析中每 10 个样品设置一个重复样，同时采用土壤标准样品（GSS1，GSD12）进行质量控制，所分析元素误差均在 5% 以内.

1.4　数据处理与分析

1.4.1　多元统计分析

为识别邢台市道路可悬浮灰尘中重金属的来源，本研究利用 SPSS 23.0 对所测样品中重金属含量数据进行了相关分析、主成分分析和聚类分析. 相关分析可以揭示元素间是否来源相同或者地球化学行为相似. 主成分分析可以将多个指标转化为少数几个综合指标来反映原始数据的信息，在研究中可以用来区分各重金属的来源. 聚类分析可以使同一类的数据尽可能地聚集在一起，不同数据尽量分离.

1.4.2　重金属污染评价方法

富集因子（EF）可以定量地表示元素的富集程度，富集因子越大，表示受到越强的人为因素的影响[18]. EF 是定量评价元素污染的富集情况与污染来源的重要指标，计算方法如下：

$$EF = (C_n/C_b)_{样品}/(C_n/C_b)_{背景} \quad (1)$$

式中，C_n 为待评估元素 n 含量（$mg \cdot kg^{-1}$）；C_b 为参比元素 b 含量（$mg \cdot kg^{-1}$）. 本文选用 Sc 为参比元素[18]. 富集程度的等级分为[11]：$EF \leqslant 2$，无富集或轻微富集；$2 < EF \leqslant 5$，中度富集；$5 < EF \leqslant 20$，显著富集；$20 < EF \leqslant 40$，强烈富集；$EF > 40$，极强富集.

2　结果与讨论

2.1　邢台市道路可悬浮灰尘中重金属含量

邢台市道路可悬浮灰尘中重金属含量的统计结果如表 1 所示. 从中可见，邢台市道路灰尘可悬浮灰尘中 Co、Cu、Zn 和 Pb 含量的平均值均是其相应河北省表层土壤背景值的 2 倍以上，而 Cr、Mn、Ni 和 As 含量的平均值则低于或接近其相应河北省表层土壤背景值. 样品中 Co、Cu、Zn 和 Pb 含量的最大值分别是 164.5、181.1、1 518.5 和 155.0 $mg \cdot kg^{-1}$，是其背景值的 12.5、8.3、19.4 和 7.2 倍，在灰尘中存在明显的富集. 且重金属 Co、Cu、Zn 和 Pb 浓度的第

表 1　邢台市区道路可悬浮灰尘中重金属含量的描述性统计分析/$mg \cdot kg^{-1}$

Table 1　Summary statistics of heavy metal contents in suspended particles of urban road dust from Xingtai City/$mg \cdot kg^{-1}$

项目	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
最小值	59.4	439.6	38.3	20.0	18.7	73.4	3.0	19.9
5%	60.7	513	43	21.6	25.6	102.8	3.4	27.8
25%	74	603.5	59	24.5	32.2	160	4.7	39
50%	87.4	654.9	67.6	27.4	46.9	273.9	5.8	60.7
平均值	98.0	708.1	79.7	29.2	52.3	355.2	6.5	65.5
75%	108.9	747.6	93.8	30.1	62.1	381.1	7.6	85.7
95%	158.7	986.5	139.7	36.4	101.3	928.7	10.6	122.5
最大值	242.6	1575.0	164.5	62.7	181.1	1 518.5	11.5	155.0
CV[1)]	37	27	40	25	56	80	35	50
河北省土壤背景值[20]	68.3	608	12.4	30.8	21.8	78.4	13.6	21.5
平均值/背景值	1.4	1.2	6.4	0.9	2.4	4.5	0.5	3.0

1）CV 单位：%

5 百分位数明显高于其相应的背景值,表明它们可能受到人为污染的影响. 重金属 Cr 浓度的第 25 百分位数高于其相应背景值,说明其来源可能与人为活动有关. 重金属 Mn、Ni 和 As 浓度的第 75 百分位数低于或略高于对应背景值,平均浓度分别是背景值的 1.2、0.9 和 0.5 倍,表明这 3 种元素主要来源于自然来源. 变异系数可以反映人为活动对重金属含量的影响[19],通常来讲,变异系数越大,受到的人类活动的影响越大,由表 1 可知,重金属元素 Cu、Pb 和 Zn 均为高变异度,说明这 3 种元素的含量可能与人为活动有关.

与现有研究中其他城市道路可悬浮灰尘重金属含量相比(表 2),西安市道路可悬浮灰尘中 Cu、Pb 和 Zn 的含量[21]均低于邢台市,这可能与邢台市区内存在燃煤企业有关. 铜陵市可悬浮灰尘中 Ni、Cu、Pb、As 和 Zn 含量[22]是邢台市可悬浮灰尘中 Ni、Cu、Pb、As 和 Zn 含量的 3.7、21.2、6.2、37.6 和 4.1 倍. 贵阳市 Pb 的含量[23]是邢台市可悬浮灰尘中 Pb 含量的 2.8 倍. 邢台市区 Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的含量均高于西宁市和包头市[15,17]. 道路可悬浮灰尘中重金属的含量与所处环境的自然条件和人类活动息息相关,这也是不同城市之间重金属浓度差异的重要原因.

表 2 不同城市道路可悬浮灰尘中重金属含量比较/mg·kg^{-1}

Table 2 Comparison of heavy metal contents in suspended dust in different cities/mg·kg^{-1}

项目	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
本研究	98.0	708.1	79.7	29.2	52.3	355.2	6.5	65.5
西安[21]	22.3	187.4	—	40.4	44	128.8	—	55.4
铜陵[22]	145.47	—	—	121.15	1 346.59	2 689.61	259.37	312.03
贵阳[23]	—	—	—	50.4	164	419	21.4	135
西宁[17]	573	409.1	50.1	22.6	40.6	108.6	3.6	52.7
包头[15]	247.8	566.3	56.2	26.1	31.5	77.5	—	59.9

2.2 邢台市道路可悬浮灰尘中重金属污染特征

邢台市区道路可悬浮灰尘中重金属污染的富集特征结果见图 2. 在邢台市可悬浮道路灰尘样品中,Ni 和 As 的 EF 均值小于 1,Cr 和 Mn 的 EF 均值小于 2,Ni 在 81% 的样品中无富集,在 19% 的样品中呈现轻微富集; As 在 96% 的样品中无富集; Cr 和 Mn 均在九成以上的样品中处于轻微富集; 表明样品中这些微量元素受到人为因素的影响较小. Co 的平均 EF 为 5.59,并且在 45% 的灰尘样品中 EF 在 5~20 之间,表现为显著富集; 55% 的 Co 的 EF 在 2~5 之间,表明邢台市可悬浮道路灰尘中的 Co 主要呈现中度富集.

Cu 的平均 EF 为 2.63,且 49% 的样品中的 Cu 的 EF 在 2~5 之间,显示出中度富集; 而在 47% 的样品中 EF 在 1~2 之间,呈现轻微富集. Zn 的平均 EF 为 5.05,且 45% 的样品中 Zn 的 EF 在 2~5 之间,表明邢台市可悬浮道路灰尘中的 Zn 主要呈现中度富集; 26% 的样品中 Zn 的 EF 在 5~20 之间,呈现显著富集; 26% 的样品中 Zn 的 EF 在 1~2 之间,呈现轻微富集. Pb 的平均 EF 为 3.19,且 51% 的样品中 Pb 的 EF 在 2~5 之间,表明邢台市可悬浮道路灰尘中的 Pb 主要呈现中度富集. Cu、Zn、Pb 在可悬浮道路灰尘中的富集范围较广,即从轻微富集到显著富集. 灰尘中 Co、Cu、Zn 和 Pb 受人类活动影响较大.

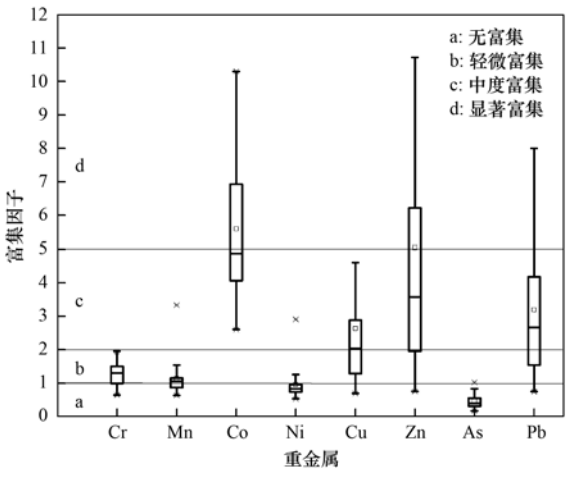

图 2 重金属污染评价结果

Fig. 2 Pollution assessment results of heavy metals

2.3 邢台市区道路可悬浮灰尘中重金属的来源解析

2.3.1 相关分析

邢台市道路可悬浮灰尘中重金属元素之间的相关分析结果见表 3. 元素 Cr-Mn(0.608)、Cr-Ni(0.693)、Mn-Ni(0.532)、在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系. 这表明 Cr、Mn 和 Ni 可能有相似的来源. Zn-Pb(0.728)、Zn-As(0.601)在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系,说明邢台市道路灰尘中 Zn、Pb 和 As 可能有相似的来源. Co 与 As 在 $P<0.01$ 水平上呈极显著负相关关系,两者在环境中的来源可能不同.

2.3.2 主成分分析

为进一步探究道路可悬浮灰尘中 8 种重金属含量间的相互关系和各污染物的来源,利用 SPSS 进行

表 3　邢台市道路可悬浮灰尘中重金属的相关分析[1)]

Table 3　Correlation analysis of heavy metals in suspended particles of urban road dust from Xingtai City

	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
Cr	1							
Mn	0.608 **	1						
Co	−0.034	−0.07	1					
Ni	0.693 **	0.532 **	−0.213	1				
Cu	0.007	0.139	−0.218	0.185	1			
Zn	−0.011	0.22	−0.298 *	0.396 **	0.243	1		
As	−0.01	0.404 **	−0.575 **	0.295 *	0.398 **	0.601 **	1	
Pb	−0.052	0.209	−0.165	0.176	0.267	0.728 **	0.354 *	1

1) * * 表示 $P<0.01$，相关性显著；* 表示 $P<0.05$，相关性显著

主成分分析(PCA)，并对其进行了 Kaiser 归一化处理. 经 KMO 和 Bartlett 球形检验，分析数据适合做主成分分析. 结果显示(表 4)，所提取的 3 个主成分的累积解释总方差为 82.38%. 3 个主成分的贡献率分别为 30.88%、30.53% 和 20.97%，其中元素 Cr、Mn 和 Ni 在主成分 1 上有着较高的正载荷，Zn、Cu 和 Pb 的较高正载荷处于主成分 2 上，As 在第 3 主成分上有较高的正载荷. Co 在第 3 主成分上有较高的负载荷，且在旋转后的成分矩阵中与前 3 个因子均呈现负相关关系.

表 4　研究区灰尘重金属含量的主成分分析

Table 4　Principal component analysis of heavy metal concentrations in the dust of the study area

金属元素	主成分			变量共同度
	1	2	3	
Cr	0.953	0.116	0.034	0.922
Mn	0.883	0.242	0.019	0.838
Co	−0.004	−0.092	−0.941	0.894
Ni	0.761	0.277	0.254	0.721
Cu	0.277	0.724	0.203	0.643
Zn	0.238	0.863	0.251	0.864
Pb	0.129	0.934	0.083	0.897
As	0.231	0.378	0.784	0.810
特征值	2.470	2.442	1.677	
解释总方差/%	30.88	30.53	20.97	
累积解释总方差/%	30.88	61.41	82.38	

2.3.2　聚类分析

树状图能明显地反映重金属之间的距离和联系[24]. 采用 Z-score 对重金属浓度数据进行标准化，计算各变量相似性的欧式距离. 采用 Ward 方法对标准化数据进行分层聚类. 聚类结果如图 3 所示，Cu、Zn 和 Pb 为第一类，As 为第二类，Cr、Mn 和 Ni 为第三类，Co 为第四类. 第一类与第二类组成了一个更高水平的类别，表明两者之间可能有相似的环境来源. 聚类分析结果与主成分分析结果吻合.

2.3.4　来源解析

综合富集因子与多元统计分析的结果，将邢台市道路可悬浮灰尘中的 8 种重金属元素分为 4 组.

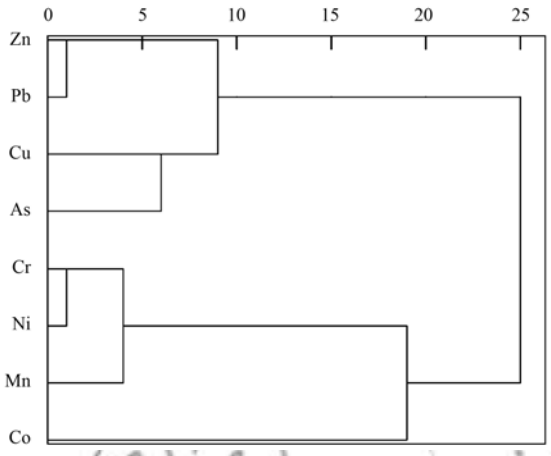

图 3　邢台市区可悬浮灰尘重金属聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of heavy metals in suspended particles of urban road dust from Xingtai City

第一组元素为 Cr、Mn 和 Ni，在主成分分析和相关系数分析中三者具有很强的正相关关系，并在聚类分析中被聚成了一簇. Mn 和 Ni 在邢台市可悬浮道路灰尘中的含量普遍较低，其平均含量均接近于河北表层土壤背景值，Mn 被看作是自然来源的特征元素[25]，可以推断 Mn 和 Ni 来源于自然环境. Guan 等[26]的研究发现工业污染是 Cr 的重要来源，邢台市道路可悬浮灰尘中 Cr 含量较高的采样点主要分布在汽车装潢厂和动力焦化厂等企业周围，因此工业污染是邢台市道路可悬浮灰尘中 Cr 的主要来源.

第二组元素由 Cu、Zn 和 Pb 组成. Zn、Pb、Cu 的富集等级均处于中度富集. 在交通繁忙地区的道路可悬浮灰尘样品中，Zn、Pb、Cu 含量最高，而在交通密度较低的居住区灰尘中，Zn、Pb、Cu 含量最低. 在工业区内，特别是换热设备厂、动力厂、焦化厂和燃煤电厂附近的灰尘样本中 Zn、Pb 含量较高. Pb 主要来源于汽车尾气和煤的燃烧[27]. 虽然早在 2000 年就已经禁止使用含铅汽油，但城市道路灰尘中铅的含量仍然反映了城市道路灰尘中铅污染的历史严重程度和铅较长的半衰期[24]. 道路灰尘中 Zn 与车辆轮胎的磨损及镀锌汽车部件的腐蚀有关[16]. Adachi

等[28]的研究认为,在制作轮胎的过程中 ZnO 作为硬化阶段的催化剂被加入其中,轮胎磨损时向环境中释放 Zn. 汽车金属的腐蚀与刹车线的材料也会造成重金属 Cu 的富集[16,29]. 吴明宏等[30]的研究表明,燃煤发电也可产生 Cu 污染. 所以推测第二组元素主要受交通、燃煤等人类活动的影响.

第三组元素为 As. 在本研究中,灰尘样本中 As 的含量均低于河北省表层土壤背景值,说明较少受到人类活动的干扰,可能来自于自然源. 第四组元素为 Co,元素 Co 在主成分分析中表现出很强的异源性,在聚类分析中与其它重金属有明显的分离. 在采集的灰尘样品中,Co 的含量较高,其平均含量是河北省表层土壤背景值的 6.4 倍. 在建筑工地、机械些制造工厂、发电厂和换热设备厂附近采集的样本中发现了较高含量 Co. 在公园与居民区附近检测到了较低含量的 Co. 元素 Co 及其化合物广泛应用于电池、陶瓷、不锈钢等制作中,并且冶炼和采矿活动、化石燃料的燃烧也可能造成 Co 的污染[25, 31]. 所以,邢台市区可悬浮灰尘中重金属 Co 主要来源于工业源.

3 结论

(1)邢台市道路可悬浮灰尘中 Co、Cu、Zn 和 Pb 的含量显著高于河北省土壤元素背景值,而 Cr、Mn、Ni 和 As 含量低于或接近于河北省土壤元素背景值.

(2)邢台市道路可悬浮灰尘中重金属富集程度为:Ni、As、Cr 和 Mn 整体表现为无富集或轻微富集,Co、Cu、Zn 和 Pb 整体表现为中度富集,所以灰尘中 Co、Cu、Zn 和 Pb 受人类影响较大.

(3)邢台市道路可悬浮灰尘中 Cr、Mn 和 Ni 主要来源于自然源和工业源,Zn、Pb 和 Cu 来源于交通和燃煤源,As 来源于自然源,Co 主要受工业活动的影响.

参考文献:

[1] Chen X D, Lu X W. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in topsoil from an area in Xi'an City, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **151**: 153-160.

[2] Xiong Q L, Zhao W J, Zhao J Y, *et al*. Concentration levels, pollution characteristics and potential ecological risk of dust heavy metals in the metropolitan area of Beijing, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(10): 1159.

[3] 解成祥, 卢新卫. 西安市冬季大气降尘中 PAHs 污染特征及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(7): 93-99.
Xie C X, Lu X W. PAHs pollution characteristics of winter dustfall in Xi'an, China and the risk assessment[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(7): 93-99.

[4] 解成祥, 卢新卫. 西安市各功能区 7 月大气降尘中多环芳烃污染特征及风险评价[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(4): 452-457.
Xie C X, Lu X W. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in July dustfall from different functional areas in Xi'an [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, **41**(4): 452-457.

[5] 耿雅妮, 梁青芳, 杨宁宁, 等. 宝鸡市城区灰尘重金属空间分布、来源及健康风险[J]. 地球与环境, 2019, **47**(5): 696-706.
Geng Y N, Liang Q F, Yang N N, *et al*. Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in dusts of the urban area of the Baoji City[J]. Earth and Environment, 2019, **47**(5): 696-706.

[6] Zhao N, Lu X W, Chao S G. Level and contamination assessment of environmentally sensitive elements in smaller than 100 μm street dust particles from Xining, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, **1**(3): 2536-2549.

[7] Lu X W, Zhang X L, Li L Y, *et al*. Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. Environmental Research, 2014, **128**: 27-34.

[8] Shabbaj I I, Alghamdi M A, Shamy M, *et al*. Risk assessment and implication of human exposure to road dust heavy metals in Jeddah, Saudi Arabia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(1): 36.

[9] Yan G, Mao L C, Liu S X, *et al*. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: A case study of two urban/rural roads[J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 942-950.

[10] Praveena S M, Aris A Z. Status, source identification, and health risks of potentially toxic element concentrations in road dust in a medium-sized city in a developing country [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(2): 749-762.

[11] Chen H, Lu X W, Chang Y Y, *et al*. Heavy metal contamination in dust from kindergartens and elementary schools in Xi'an, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(6): 2701-2709.

[12] 韩秀凤, 卢新卫. 包头市公园及广场灰尘中重金属污染特征[J]. 环境化学, 2016, **35**(12): 2606-2614.
Han X F, Lu X W. Contamination characteristics of heavy metals in dusts from square and park of Baotou, China [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(12): 2606-2614.

[13] 于向楠, 李飞扬, 符耿雪, 等. 北京市道路尘中重金属时空分布特征及污染程度评价[J]. 现代地质, 2019, **33**(1): 169-175.
Yu X N, Li F Y, Fu G X, *et al*. The spatial-temporal distribution characteristics and contamination assessments of heavy metals in the road dusts of Beijing[J]. Geoscience, 2019, **33**(1): 169-175.

[14] Wang Q, Lu X W, Pan H Y. Analysis of heavy metals in the re-suspended road dusts from different functional areas in Xi'an, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(19): 19838-19846.

[15] Xu X, Lu X W, Han X F, *et al*. Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China[J]. Current Science, 2015, **108**(1): 72-79.

[16] Zhao N, Lu X W, Chao S G, *et al*. Multivariate statistical analysis of heavy metals in less than 100 μm particles of street

dust from Xining, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(5): 2319-2327.

[17] Zhao N, Lu X W, Chao S G. Risk assessment of potentially toxic elements in smaller than 100-μm street dust particles from a valley-city in northwestern China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2016, **38**(2): 483-496.

[18] 梁青芳, 杨宁宁, 高煜, 等. 宝鸡市不同功能区灰尘重金属污染特征与评价[J]. 环境工程, 2019, **37**(10): 216-221.
Liang Q F, Yang N N, Gao Y, *et al*. Characteristics and assessment of heavy metals in dust of different functional areas in Baoji, China[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(10): 216-221.

[19] 石栋奇, 卢新卫. 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3126-3133.
Shi D Q, Lu X W. Contamination levels and source analysis of heavy metals in the finer particles of urban road dust from Xi'an, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3126-3133.

[20] 国家环境保护局, 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.

[21] 周潇, 卢新卫, 蔡月, 等. 西安市不同功能区可悬浮灰尘中重金属含量、形态及污染评价[J]. 环境化学, 2018, **37**(9): 1921-1927.
Zhou X, Lu X W, Cai Y, *et al*. Levels, speciation and pollution assessment of heavy metals in the suspended dusts from different functional areas of Xi'an City[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(9): 1921-1927.

[22] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(12): 2261-2270.
Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al*. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(12): 2261-2270.

[23] 李晓燕. 季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2407-2415.
Li X Y. Influence of season change on the level of heavy metals in outdoor settled dusts in different functional areas of Guiyang City[J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2407-2415.

[24] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods[J]. CATENA, 2012, **98**: 73-78.

[25] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution[J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1361-1369.

[26] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al*. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. Chemosphere, 2018, **193**: 189-197.

[27] 张东明, 吕新, 王海江, 等. 工业区周边农田重金属污染评价及来源分析[J]. 土壤通报, 2017, **48**(3): 715-723.
Zhang D M, Lv X, Wang H J, *et al*. Heavy metal pollution assessment and source analysis on farmland soil around an industrial area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(3): 715-723.

[28] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust[J]. Environment International, 2004, **30**(8): 1009-1017.

[29] Lu X W, Wang L J, Li L Y, *et al*. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3): 744-749.

[30] 吴明宏, 方凤满, 姚有如, 等. 淮南市石楠叶片重金属分布特征、来源及对大气污染的指示作用[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(1): 297-302.
Wu M H, Fang F M, Yao Y R, *et al*. Distribution characteristics and sources of heavy metals in photinia leaves and their directive role in air pollution in Huainan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(1): 297-302.

[31] Aminiyan M M, Baalousha M, Mousavi R, *et al*. The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: a case study in Rafsanjan, SE Iran[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(14): 13382-13395.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 7

Jul. 15, 2020

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China ····· TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, *et al.* (2981)

Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change ····· YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)

Evaluation of the Reduction in $PM_{2.5}$ Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou ····· WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, *et al.* (3004)

Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter ····· FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, *et al.* (3012)

Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province ····· LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, *et al.* (3021)

Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3031)

Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, *et al.* (3042)

Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou ····· QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, *et al.* (3056)

Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan ····· NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, *et al.* (3066)

Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode ····· JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, *et al.* (3076)

Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer ····· OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, *et al.* (3085)

Source Apportionment of Atmospheric Ammonia: Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language ····· GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, *et al.* (3095)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou ····· LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, *et al.* (3102)

Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode ····· XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, *et al.* (3112)

Comparative Analysis of NO_x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process ····· LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, *et al.* (3121)

Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City ····· SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, *et al.* (3130)

Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter ····· WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)

Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain ····· ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, *et al.* (3148)

Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin ····· TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, *et al.* (3157)

Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin ····· QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, *et al.* (3165)

Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors ····· QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, *et al.* (3175)

Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake ····· WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, *et al.* (3186)

Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed ····· WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, *et al.* (3194)

Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China ····· ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)

Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang ····· LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, *et al.* (3212)

Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin ····· WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, *et al.* (3222)

Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir ····· LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (3231)

Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes ····· WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, *et al.* (3240)

Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet ····· LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, *et al.* (3249)

Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater ····· WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)

Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River ····· WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, *et al.* (3266)

Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo ····· XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, *et al.* (3275)

Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir ····· YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, *et al.* (3285)

Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems ····· BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, *et al.* (3297)

Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water ····· LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, *et al.* (3307)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar ····· CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, *et al.* (3315)

Enhanced Chromate (Ⅵ) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe^0/WMF) ····· JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, *et al.* (3326)

Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite ····· LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, *et al.* (3337)

Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter ····· WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, *et al.* (3345)

Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater ····· ZHANG Xin-rui, CHI Yu-lei, WANG Qian, *et al.* (3356)

Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge ····· XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, *et al.* (3365)

Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature ····· GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, *et al.* (3373)

Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China ····· DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, *et al.* (3384)

Relationship Between CO_2 and CH_4 Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network ····· LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, *et al.* (3392)

Effects of Controlled-Release Urea Application on N_2O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil ····· JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, *et al.* (3402)

Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China ····· ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, *et al.* (3410)

Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils ····· HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, *et al.* (3418)

Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil ····· SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, *et al.* (3426)

Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai ····· CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, *et al.* (3434)

Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings ····· YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, *et al.* (3441)