ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 38 卷 第 12 期
2017 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征 …… 王燕丽, 薛文博,雷宇,王金南,武卫玲(4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据"源""汇"景观的大气霾效应 …… 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆(4905)
基于多源数据的 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布预测与制图 …… 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 $PM_{2.5}$ 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 … 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉(4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 …… 张程,于兴娜,安俊琳,朱彬,林梦凡(4932)
菏泽市 $PM_{2.5}$ 碳组分季节变化特征 …… 刘泽珺,吴建会,张裕芬,梁丹妮,马咸,刘保双, 冯银厂,张勤勋(4943)
辽宁典型城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 …… 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝(4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 …… 姚青, 刘子锐, 韩素芹,蔡子颖,刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思(4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 $PM_{2.5}$ 理化特征分析 …… 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 …… 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜(4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 …… 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远(4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 …… 董小芳, 杨华玮,张峦, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 …… 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷(5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 …… 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷(5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 …… 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静(5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 …… 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 职音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 …… 李艳利, 孙伟, 杨梓睿(5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应:以太湖乌溪港为例 …… 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影(5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 …… 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇(5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 …… 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思(5063)
北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险 …… 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅(5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 …… 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广(5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 …… 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪(5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 …… 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平(5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 …… 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励(5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 …… 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖(5116)
MIL-88A@ MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 …… 王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华(5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 …… 徐婷, 金艳青, 李勇(5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 …… 成雪君,王学江, 王浩,张志昊,赵建夫(5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 …… 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊(5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 …… 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良(5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 …… 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王骁静(5162)
游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验 …… 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹(5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 …… 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾竞宇(5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 …… 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良(5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 …… 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽(5192)
活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数 …… 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博(5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 …… 张宁博, 李祥, 黄勇(5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 …… 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅(5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 …… 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军(5222)
长期暴露下纳米 TiO_2 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 …… 李慧婷, 崔福义(5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 …… 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟(5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 …… 张田, 许浩,茹淑华,苏德纯(5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 …… 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强(5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 …… 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛罡, 高品(5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 …… 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞(5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 …… 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成(5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 …… 周雅, 毕春娟, 周枭潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一(5292)
基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 …… 高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒(5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发 …… 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊,邓泓(5308)
麦田 O_3 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 …… 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清(5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 …… 侯朋福, 薛利祥, 俞映倞, 薛利红, 范立慧, 杨林章(5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N_2O 排放的影响 …… 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼(5333)
成都平原不同类型沟渠 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放通量特征及其影响因素 …… 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏(5344)
河流 CO_2 与 CH_4 排放研究进展 …… 王晓锋,袁兴中,陈槐,何奕忻,罗珍,刘恋,何宗苡(5352)
《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 …… (5367)
《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价

郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛罡, 高品*
(东华大学环境科学与工程学院, 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620)

摘要: 通过原子光谱法对上海某生活垃圾焚烧厂周边表层土壤样品中 As、Cu、Cd、Cr、Pb、Ni、Zn、Ti、Mn 和 Hg 等 10 种重金属含量进行测定, 利用富集因子、多元统计和空间插值方法分析重金属来源和空间分布特征, 并评价土壤重金属的潜在生态风险水平. 结果表明, 除 Hg 和 As 未检出外, 土壤中其他重金属平均含量范围为 0.399 ~ 4 220 mg·kg^{-1}, Cu、Cd、Cr、Pb、Ni、Zn 和 Mn 等 7 种重金属平均含量均高于土壤背景含量, 其中 Cd 平均含量是背景含量的 2.9 倍. 通过相关性分析、主成分分析、富集因子分析和重金属空间分布特征分析可知, Ti、Mn 和 Ni 空间分布特征相似, 主要由自然源贡献; Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的分布特征具有一定相似性, 其来源主要与工业生产、焚烧烟气和交通运输污染有关. 潜在生态风险评价结果显示, 被检出重金属的综合潜在生态风险指数均值为 108.92, 表明垃圾焚烧厂周边土壤处于中等生态风险水平, 其中 Cd 贡献率高达 79.63%, 应引起重视.

关键词: 生活垃圾焚烧厂; 表层土壤; 重金属; 污染特征; 潜在生态风险
中图分类号: X53; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)12-5262-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201704113

Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai

GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, YU Guang-jie, TANG Zheng, LIU Zhen-hong, XUE Gang, GAO Pin*
(State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The contents of ten heavy metals (As, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, Ti, Mn, and Hg) were determined in the surface soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai using atomic spectroscopy. The spatial distribution and sources of the detected heavy metals were studied by enrichment factor and multivariate statistical and spatial interpolation analyses. In addition, their potential ecological risk was assessed. The results showed that all heavy metals, except Hg and As, were detected with mean contents ranging from 0.399 to 4 220 mg·kg^{-1}. The mean contents of Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, and Mn were higher than their respective background values in Shanghai. In particular, the mean content of Cd was 2.9 times its background value. The results of the Pearson's correlation, principle component, enrichment factor, and spatial distribution analyses of these heavy metals indicated that Ti, Mn, and Ni primarily originated from natural sources, while Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn originated from industrial manufacturing, combustion, and traffic emissions. The potential ecological risk assessment showed that soils surrounding the municipal solid waste incineration plant suffered from a moderate-level risk. The mean value of the potential ecological risk index of these detected heavy metals was 108.92, of which Cd contributed as high as 79.63%, deserving much attention.

Key words: municipal solid waste incineration plant; surface soil; heavy metal; pollution characteristic; potential ecological risk

随着我国城市化和工业化进程的加快, 城市生活垃圾产生量日益增加. 据统计[1], 2015 年我国城市生活垃圾清运量已达 1.9×10^8 t, 其中上海市约为 6.1×10^6 t. 我国城市生活垃圾处置方法主要包括填埋、焚烧和堆肥[2], 相比填埋和堆肥方法, 焚烧处理具有显著的减量化效果, 并可回收余热, 逐渐成为国内外生活垃圾处置的重要方法[3]. 截止 2015 年年底, 我国已建成并投入运行的垃圾焚烧厂约有 220 座, 焚烧处置生活垃圾已超过 6.1×10^7 t·a^{-1}[1].

由于我国目前生活垃圾收集方式以混合收集为主, 组分复杂, 一些含重金属的垃圾经焚烧后, 重金属会转化成气态或颗粒态迁移至焚烧烟气, 通过

收稿日期: 2017-04-12; **修订日期**: 2017-06-09
基金项目: 上海市自然科学基金项目(17ZR1400400); 东华大学"励志计划"项目; 中央高校基本科研业务费专项
作者简介: 郭彦海(1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复理论与技术, E-mail:741725742@qq.com
* 通信作者, E-mail:pingao@dhu.edu.cn

干湿沉降等途径进入垃圾焚烧厂周边土壤中[4]. 大多数重金属具有强毒性，难以被土壤微生物降解，能够在土壤中不断累积，并在生物体内富集. 此外，部分重金属在形态转化过程中还有可能会生成一些毒性更强的化合物，从而对土壤生态环境造成严重污染影响.

目前，国内外已有较多针对垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染的研究报道[3,5]，如钟山等[3]研究发现嘉兴垃圾焚烧厂周边土壤已存在重金属累积，其中 Pb 为最大污染贡献源，主要来源于焚烧尾气的扩散沉降. 此外，Bretzel 等[5]的研究同样发现，意大利 Pisa 垃圾焚烧厂排放的焚烧烟气是其周边土壤中 Pb、Cd 和 Hg 污染累积的主要原因. 尽管如此，已有的相关研究主要侧重于重金属含量水平和时空分布特征，而对其潜在生态风险评价方面的研究报道还较少.

本文以上海某生活垃圾焚烧厂作为研究对象，对其周边土壤中不同重金属含量分布特征进行检测分析，并利用潜在生态风险评价方法评估垃圾焚烧厂周边土壤中重金属污染风险水平，以期为相关地区垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染控制及生态风险评价提供参考.

1　材料与方法

1.1　垃圾焚烧厂概况

本研究所选择的生活垃圾焚烧厂位于长江中下游平原，现日处理量约为1 500 t，采用技术先进的往复顺推式机械移动炉排，焚烧烟气采用半干法、喷活性炭和袋式除尘器组合工艺进行净化处理后高空排放.

1.2　样品采集

本研究共采集了 24 个土壤样品，采样时间为 2016 年 7 月. 结合当地地形特征，采用辐射形布点法，设定西(W)、西北(NW)、北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)这 8 个采样方向(如图 1)，每个方向分别在 600、1 600 以及 3 600 m处各设一个样点. 实地采样时，采用梅花形布点方法，每个样品由样点 4 m×4 m 范围内采集的 5 个等容小样均匀混合而成. 每个样点垂直采集 0～20 cm 表层土壤，混合后装入聚乙烯袋内. 土壤样品约为 1 kg，贴签后运回实验室备用.

1.3　样品处理与检测分析

将采集的土壤样品自然风干，去除砂砾和植物残屑等，研碎过 2 mm 尼龙筛并混匀，采用四分法

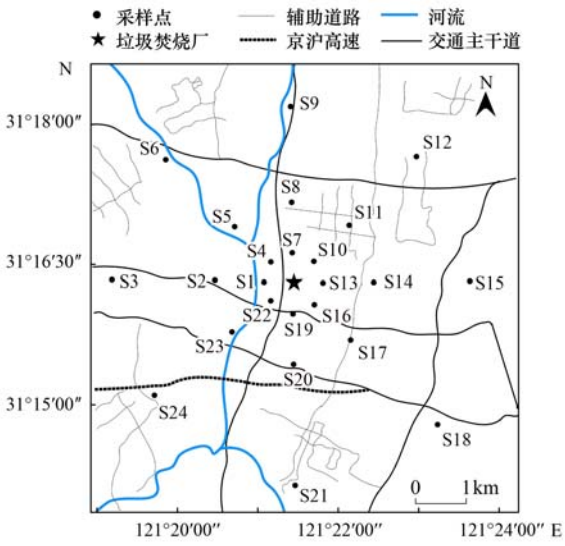

图 1　采样点位置示意

Fig. 1　Distribution of soil sampling sites

取一部分用石英研钵继续研磨至全部通过 100 目尼龙筛，混匀备用. 土壤样品经 HNO_3-HCl-HF-H_2O_2 消解后，采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES，珀金埃默尔)检测分析 As、Cu、Cd、Cr、Pb、Ni、Zn、Ti、Mn 和 Fe 的含量水平，检出限范围为 0.05～4.45 mg·kg^{-1}，其中 Fe 用来进行重金属富集因子分析评价；另取土壤样品经 H_2SO_4-HNO_3-$KMnO_4$ 消解后，采用冷原子荧光测汞仪(上海华光仪器仪表厂)检测分析 Hg 含量. 所有样品重复测定 3 次，均使用重金属标准溶液检测回收率. 采用国家一级土壤标准物质(GBW07403)对分析方法的准确度和精确度进行检验，并按比例随机检查和异常点检查进行质量控制[6]. 土壤 pH 值测定时先将土样与去离子水按质量比 1∶2.5 进行混合，然后使用 pH 计(梅特勒)进行测定.

1.4　数据处理与分析

1.4.1　多元统计和空间插值分析

采用 SPSS18.0 对土壤样品中重金属含量进行描述性统计分析、Pearson 相关性分析及主成分分析，并采用 ArcGIS10.2 进行克里格插值.

1.4.2　富集因子法

采用富集因子法评估垃圾焚烧厂周边土壤中重金属富集程度和来源，以 Fe 作为参比元素[7]，计算公式如下：

$$EF = (C_x/C_{Fe})_{soil}/(C_x/C_{Fe})_{background}$$

式中，$(C_x/C_{Fe})_{soil}$ 为土壤中被检出重金属含量与 Fe 含量比值；$(C_x/C_{Fe})_{background}$ 为被检出重金属背景含量与 Fe 背景含量比值. 通常认为，EF≈1 时

说明该元素来源于地壳风化；EF > 1 则说明该元素的分布受到人为活动的污染影响. 本研究以上海市土壤环境背景含量[8]作为比较基准，根据富集因子数值对重金属富集水平进行分级[9]：EF < 1 为无富集；1 ≤ EF < 3 为轻微富集；3 ≤ EF < 5 为中度富集；5 ≤ EF < 10 为较重富集；10 ≤ EF < 25 为重度富集；25 ≤ EF < 50 为严重富集；EF > 50 为极重富集.

1.4.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法综合环境化学和生态毒理学等内容，以定量方法划分出重金属潜在危害程度，是目前污染物生态风险研究中应用最为广泛的评价方法之一[10]，其计算方法如下：

(1)单个污染物污染系数的计算公式为：

$$C_f^i = C_D^i / C_B^i$$

式中，C_D^i 为土壤样品中重金属含量实测值，C_B^i 为计算所需的参比值，本研究以上海市土壤环境背景含量[8]作为比较基准. 单个污染物污染系数 C_f^i 能够说明单个污染物的污染情况，分为 4 个等级，如表 1 所示.

(2)单个重金属潜在生态风险系数(E_r^i)可按下式确定：

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

式中，E_f^i 描述某单一污染物的风险程度，从低到高分为 5 个等级(见表 1)；T_r^i 为各重金属毒性响应系数. 重金属 Cd、Cu、Cr、Pb、Ni、Zn、Ti 和 Mn 的毒性响应系数分别为 30、5、2、5、5、1、1 和 1[10,11].

(3)多个重金属综合潜在生态风险指数(RI)可按下式确定：

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i$$

式中，RI 描述某一采样点多个污染物潜在生态风险系数综合值，分为 4 个等级，如表 1 所示.

根据已有研究[12,13]，E_r^i 值风险分级的第一级上限值可由非污染的污染系数($C_f^i = 1$)与参评污染物中最大毒性系数相乘得到，其他风险级别的上限值分别采用上一级的风险值乘 2 得到. 本研究中被检出重金属 Cd 的 T_r^i 值最大(30)，故 E_r^i 第一级上限值(轻微生态风险)调整为 30. RI 的大小与参评污染物的种类和数量有关，污染物毒性越强、类别越多，RI 值就越大. 因此，在采用 RI 进行潜在生态风险评价时，应根据参评污染物的数量和种类来对其进行调整. 本研究 RI 值分级标准调整如下[14,15]：先根据原 RI 第一级分级值 150 除以 Hakanson 研究中 8 种污染物 PCB、Hg、As、Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的毒性系数总值 133，然后将得到的单位毒性系数 RI 分级值 1.13 乘以本研究中 8 种重金属的毒性系数总值 50，并取十位整数获得 RI 第一级界限值 60，余下各级别界限值可由上一级界限值乘以 2 所得，如表 1 所示.

表 1 重金属污染程度与潜在生态风险分级标准

Table 1 Grading standards for heavy metal contamination and potential ecological risk

评价范围	污染程度	评价范围	风险程度	RI 评价范围	风险程度
$C_f^i < 1$	轻微污染	$E_r^i < 30$	轻微生态风险	RI < 60	轻微生态风险
$1 \leqslant C_f^i < 3$	中等污染	$30 \leqslant E_r^i < 60$	中等生态风险	60 ≤ RI < 120	中等生态风险
$3 \leqslant C_f^i < 6$	较高污染	$60 \leqslant E_r^i < 120$	较高生态风险	120 ≤ RI < 240	较高生态风险
$C_f^i \geqslant 6$	高污染	$120 \leqslant E_r^i < 240$	高生态风险	RI ≥ 240	高生态风险
		$E_r^i \geqslant 240$	极高生态风险		

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量的描述性统计分析

本研究所有土壤样品 pH 值范围在 7.07 ~ 8.21 之间，偏碱性，土壤中重金属含量描述性统计结果见表 2. 可以看出，除 Hg 与 As 未检出外，其余重金属 Cd、Cr、Cu、Ti、Mn、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.399、85.2、31.4、4220、605.8、31.14、27.36 和 99.20 mg·kg^{-1}，均高于上海市土壤背景含量[8]，其中 Cd 平均含量和最大含量分别为背景含量的 2.9 和 7.7 倍，表明这些重金属在垃圾焚烧厂周边土壤中已发生累积. 尽管如此，与《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)[16]二级标准(pH > 7.5)相比，除 Ti 和 Mn 未规定参考值外，其他重金属平均含量均未超出标准限值.

根据比较分析可知，本研究区域土壤中 Cu 平均含量为 31.42 mg·kg^{-1}，略高于上海徐汇、闵行和奉贤区土壤中含量(27.80 mg·kg^{-1})[17]；Cd 和 Pb 平均含量分别为 0.399 mg·kg^{-1} 和 27.36 mg·kg^{-1}，同样高于其在上海农田土壤中的平均含量(0.196 mg·kg^{-1} 和 26.4 mg·kg^{-1})[18]. 与国内外其他垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平相

比，本研究区域 Cd 和 Pb 平均含量高于西班牙 Tarragona 地区垃圾焚烧厂[19]周边土壤含量水平，而 Cr 平均含量(85.17 mg·kg^{-1})高于深圳清水河垃圾焚烧厂(51.7 mg·kg^{-1})[4]和英国 Newcastle 地区垃圾焚烧厂(55.0 mg·kg^{-1})[20]周边土壤中含量水平.

从偏度和峰度分析，除 Cr 外，其他重金属均近似正态分布. 变异系数能够反映不同采样点之间的平均变异程度[14]，同时也可以反映该元素受人为因素的影响程度. 变异系数越小，表明该重金属以本地自然背景含量为主；变异系数越大，则表明其分布受人为因素影响程度较大[21]. 由表 2 可知，Ti 和 Ni 的变异系数分别为 5.8% 和 14.9%，属于低度变异(变异系数 <15%)；Cr、Cu、Pb、Zn 和 Mn 的变异系数分别为 30.9%、31.2%、23.3%、23.5% 和 16.1%，属于中等变异(15% < 变异系数 < 36%)；Cd 的变异系数为 55.1%，属于高度变异(变异系数 >36%). 由此可见，本研究区域土壤中 Cd 的变异系数最大，表明其分布最不均匀，受人为因素污染影响程度大.

表 2　研究区域土壤重金属描述性统计结果1)

Table 2　Descriptive statistics of heavy metals in soils of the study area

元素	含量范围 /mg·kg^{-1}	平均含量 /mg·kg^{-1}	标准差	偏度	峰度	变异系数 /%	上海市土壤背景含量[9] /mg·kg^{-1}	GB 15618-1995 二级标准[16] /mg·kg^{-1}
Cd	0.083 ~ 1.065	0.399	0.22	1.81	3.49	55.1	0.138	0.6
Cr	66.5 ~ 201.0	85.2	26.31	3.99	17.85	30.9	68.5	250
Cu	18.3 ~ 65.5	31.4	9.81	1.91	5.48	31.2	27.2	100
Mn	466.8 ~ 794.6	605.8	97.78	0.59	-0.56	16.1	548.0	—
Ni	24.6 ~ 41.7	31.14	4.63	0.67	0.26	14.9	29.9	60
Pb	15.5 ~ 43.2	27.36	6.38	0.55	0.51	23.3	25.0	350
Zn	59 ~ 153.5	99.20	23.32	0.56	0.18	23.5	81.3	300
Ti	3 775 ~ 4 648	4 220	246.65	-0.09	-0.77	5.8	4 300	—
Hg	ND	—	—	—	—	—	0.095	1
As	ND	—	—	—	—	—	9.1	25

1)“—”表示文章中没有相关数据；“ND”表示未检出

2.2　相关性分析

不同重金属之间相关性分析有助于辨识重金属来源[6,22,23]，因此本研究针对被检出重金属之间进行 Pearson 相关性分析，结果如表 3 所示. 分析可知，垃圾焚烧厂周边土壤中 Ni、Ti 和 Mn 之间具有极显著相关性(P <0.01)，表明这 3 种重金属具有同源性. 结合表 2，Ni、Ti 和 Mn 变异系数最低，表明其受人为因素污染影响程度较小. Zn 和 Cd、Zn 和 Cu、以及 Zn 和 Pb 之间相关系数分别为 0.563、0.694 和 0.608，同样具有极显著相关性(P <0.01).

表 3　重金属含量相关性分析1)

Table 3　Pearson correlation analysis of heavy metals

	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Ti
Cd	1.000							
Cr	0.125	1.000						
Cu	0.244	0.174	1.000					
Mn	-0.039	0.211	-0.138	1.000				
Ni	0.043	0.067	-0.073	0.786**	1.000			
Pb	0.264	0.205	0.486*	0.192	0.400	1.000		
Zn	0.563**	0.313	0.694**	0.219	0.217	0.608**	1.000	
Ti	-0.163	-0.207	-0.149	0.592**	0.821**	0.339	-0.049	1.000

1) ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著；* 表示相关系数在 0.05 水平上显著

2.3　主成分分析

主成分分析能够较好地结合相关性分析对重金属来源进行判定[24,25]. 本研究检测数据经 KMO 检验和 Bartlett 球度检验后(P <0.001)，主成分分析结果具有统计学意义[26]. 根据特征值大于 1 的原则，所提取的 3 个主成分方差累计贡献率达 78.29%(表 4)，表明该结果在一定程度上能够真实地反映出垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染来源情况. 此外，各主成分因子载荷分布如图 2 所示.

主成分 1(principal component 1，PC1)方差贡献率为 33.12%，Ni、Ti 和 Mn 具有较高正载荷，各因子载荷分别为 0.954、0.898 和 0.851. Mn 通常

作为土壤自然源标识元素[27]，其受外界干扰影响较小，主要受成土过程和土壤流失影响. Ti 通常被称为抗风化元素[28]，其具有较强的抗风化能力、相对不移动和很少外来污染等特征，对研究土壤是否受到重金属污染具有重要价值. Ni 是我国城市土壤污染程度最低的重金属之一[29,30]. Sun 等[30]研究报道，吉林德惠地区土壤中 Ni 元素未明显受到人类活动的污染影响，而 Facchinelli 等[31]研究同样发现，意大利西北部地区土壤中 Ni 含量变化主要是由成土过程造成的. 由此可见，主成分 1 主要来源于成土母质.

主成分 2(PC2)方差贡献率为 30.80%，Cd、Cu、Pb 和 Zn 具有较高正载荷，各因子载荷分别为 0.619、0.828、0.739 和 0.896. 结合上述描述性统计与相关性分析结果可知，这些重金属平均含量高于本地区土壤背景含量，表明其主要受人为源污染影响，这与其他研究结果相似[32~34]. 事实上，除垃圾焚烧厂燃烧烟气排放影响外，电光源制造、交通设备加工等工业活动均会向周边环境排放 Cd、Cu、Pb 和 Zn[35]，汽车尾气排放、轮胎磨损或燃料及润滑油泄漏等同样会产生含 Cd、Cu 和 Zn 等重金属的烟尘，从而造成其在周边土壤中累积[36]. 此外，四乙基铅作为抗爆剂通常被添加至汽油中，尽管我国从 2000 年起已全面禁用含铅汽油，但汽车尾气的排放对交通道路周边土壤中 Pb 累积的影响仍存在于土壤中[37]. 本研究区域内存在工业区和交通主干道路等，因此可判断主成分 2 主要反映工业生产活动、交通运输等人类活动影响.

表 4 重金属含量主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis of heavy metals in soils

重金属	PC1	PC2	PC3
Cd	-0.094	0.619	0.127
Cr	0.022	0.176	0.933
Cu	-0.157	0.828	-0.015
Mn	0.851	-0.038	0.327
Ni	0.954	0.104	0.037
Pb	0.396	0.739	-0.034
Zn	0.124	0.896	0.240
Ti	0.898	-0.051	-0.309
特征值	2.649	2.464	1.150
方差贡献率/%	33.12	30.80	14.37
累计贡献率/%	33.12	63.92	78.29

主成分 3(PC3)方差贡献率为 14.37%，Cr 具有较高正载荷，其因子载荷为 0.933. 由表 2 可知，本研究区域土壤中 Cr 平均含量高于背景含量，且变异系数达 30.9%，为中等变异水平，表明 Cr 受人类活动的影响程度较大. Van Bohemen 等[38]的研究发现，汽车制动部件和轮胎磨损过程中会释放一定数量的重金属 Cr. 此外，研究区域内垃圾焚烧烟气排放，以及喷涂、电镀等行业的生产活动同样会对土壤中 Cr 含量产生影响. 因此，主成分 3 主要反映了交通运输、焚烧烟气排放和喷涂、电镀生产活动的输入污染影响.

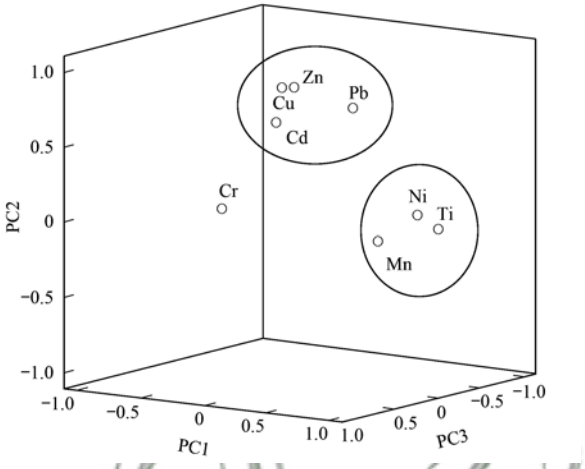

图 2 旋转成分载荷

Fig. 2 Component plot in rotated space

2.4 重金属富集与污染程度分析

土壤中各重金属富集因子计算值如表 5 所示. 分析可知，Cd 在研究区域内总体表现为轻微富集，其中在采样点 S1(4.80)、S10(3.28)和 S20(3.34)达到中度富集水平，在采样点 S4(6.07)和 S15(7.90)达到较重富集水平，仅在 S5(0.58)表现为无富集，其余采样点均为轻微富集. Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 总体表现为轻微富集水平，其中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 仅有 20.8% ~33.3% 的点位表现为无富集，其余点位均为轻微富集. Ti 和 Ni 富集因子均值小于 1，总体表现为无富集，分别仅有 8.3% 和 25% 的点位表现为轻微富集. 由此可见，土壤中 Ti 和 Ni 来源主要为自然源，而 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 则受人类活动影响较大. 此外，Mn 在 13 个采样点表现为轻微富集水平，在其余 11 个采样点表现为无富集，通过富集因子法难以判断其确切来源. 尽管如此，由于 Mn 在自然界中主要受成土过程影响较大，结合上述相关性与主成分分析结果，Ni、Ti 和 Mn 之间具有显著相关性，且在同一主成分具有较高正载荷，表明这 3 种重金属具有同源性，主要由自然源贡献.

图 3 为土壤中各重金属污染系数. 由单个重金属的污染系数可以看出，Cd 污染系数平均值为

2.89，属于中等程度污染，其中在采样点 S1(5.38)、S10(3.50)、S11(3.08)、S20(3.31)和 S23(3.14)为较高程度污染水平，在采样点 S4(6.79)和 S15(7.72)达到高污染水平. Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 污染系数平均值分别为 1.24、1.16、1.11、1.04、1.09 和 1.22，为中等污染水平；Ti 污染系数平均值为 0.98，属轻微污染水平. 因此，各重金属污染程度由高到低次序为：Cd > Cr > Zn > Cu > Mn > Pb > Ni > Ti，与重金属富集程度分析结果一致.

表 5　以 Fe 为参比元素时土壤中重金属富集因子

Table 5　Enrichment factors of heavy metals with Fe as the reference element

重金属	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Ti
EF 范围	0.58 ~ 7.90	0.88 ~ 2.99	0.69 ~ 2.28	0.79 ~ 1.37	0.75 ~ 1.26	0.64 ~ 1.63	0.75 ~ 1.93	0.81 ~ 1.05
EF 均值	2.72	1.17	1.09	1.04	0.98	1.03	1.15	0.92

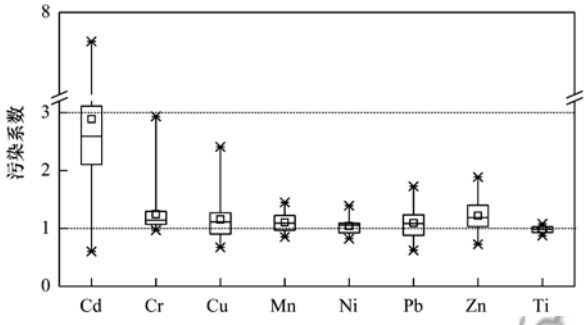

图 3　研究区域被检出重金属污染系数

Fig. 3　Contamination factor of heavy metals in soils in the study area

2.5　重金属含量空间分布特征

克里格插值法是对区域变量进行无偏估值的可靠方法之一. 根据所确定的研究区域，通过 ArcGIS10.2 中普通克里格方法，在约束条件下根据各采样点重金属含量对研究区域土壤中重金属含量进行无偏最优估值. 经 K-S 检验可知，Cu、Cd、Pb、Ni、Zn、Ti 和 Mn 均符合正态分布，Cr 经对数转化后同样符合正态分布，由此可得垃圾焚烧厂周边土壤中重金属含量的空间分布情况，如图 4 所示.

从图 4 中可以看出，本研究区域内 Mn、Ti 和 Ni 的空间分布[图 4(d)、4(h)、4(e)]呈现出带状和岛状相结合的分布特点，其含量从 NW 方向到 SE 方向总体呈逐步递减的变化趋势. 其中，Ti 的样本均值低于背景含量，进一步证明其受人类活动影响很小，在 NW 方向上的富集主要是由于地质环境条件引起的. 由图 4(a)、4(b)、4(c)、4(f)和 4(g)分析可知，Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的空间分布特征呈现明显的风向特征. Pb 元素通常可作为焚烧烟气排放的标识性污染物，一般认为区域风向对焚烧烟气的扩散和沉降具有重要影响[3]. 由图 4 分析可知，位于垃圾焚烧厂 NW 偏 W 方向 600 m 处同时存在 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Mn、Ti 和 Ni 的较高含量区，结合富集因子分析结果，Mn、Ti 和 Ni 富集因子均小于 1，表明这 3 种元素在该区域的较高含量是由成土过程造成的. Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 富集因子均大于 1，表明其受人为活动污染影响较大，原因可能包括两方面：一是该区域位于两个交通主干道交汇处，行驶车辆密度高，受交通源污染影响较大；二是该区域处于夏季主导风向(SE)下游，垃圾焚烧烟气中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 等重金属经烟囱高空排放后，通过干湿沉降落于周边土壤中. 此外，冬季主导风向(NW)下游偏 E 方向3 600 m处出现 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 高含量区，该区域目前主要为居民生活区，道路车辆密集. 从 Pb 空间分布特征可以看出，位于垃圾焚烧厂夏季主导风向(SE)下游 W 方向上约3 600 m处出现高含量区，呈现明显的带状分布特征，这与钟山等[3]的研究结果一致，且该区域内有交通主干道路. 由此可见，研究区域内 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的高含量分布区主要是由垃圾焚烧烟气和交通源污染共同作用所造成的. Cr 空间分布在 W 方向上存在一个高含量区[图 4(c)]，经实地调研发现，该区域以前是一家机动轮椅车厂，在生产加工过程中需要对金属表面进行镀 Cr 处理，因此会排放含 Cr 废气，导致其在周边土壤中累积. 此外，由图 4(b)分析可知，在垃圾焚烧厂 S 方向存在另一个 Cu 高含量区，由于该区域临近工业区，很大程度上会受到工业生产过程中含 Cu 废弃物的污染影响.

2.6　潜在生态风险评价

本研究重金属潜在生态风险评价结果见表 6. 图 5 为重金属综合生态风险指数分布. 可以看出，不同重金属的潜在生态风险系数由高到低分布为 Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn > Mn > Ti. 针对分析可知，Cd 潜在生态风险系数平均值为 86.73，属于较高生态风险水平，其余重金属潜在生态风险系数范围为 0.98 ~ 5.78，属于轻微生态风险水平. 针对 RI 计算值进行分析可知，本研究区域 RI 平均值为

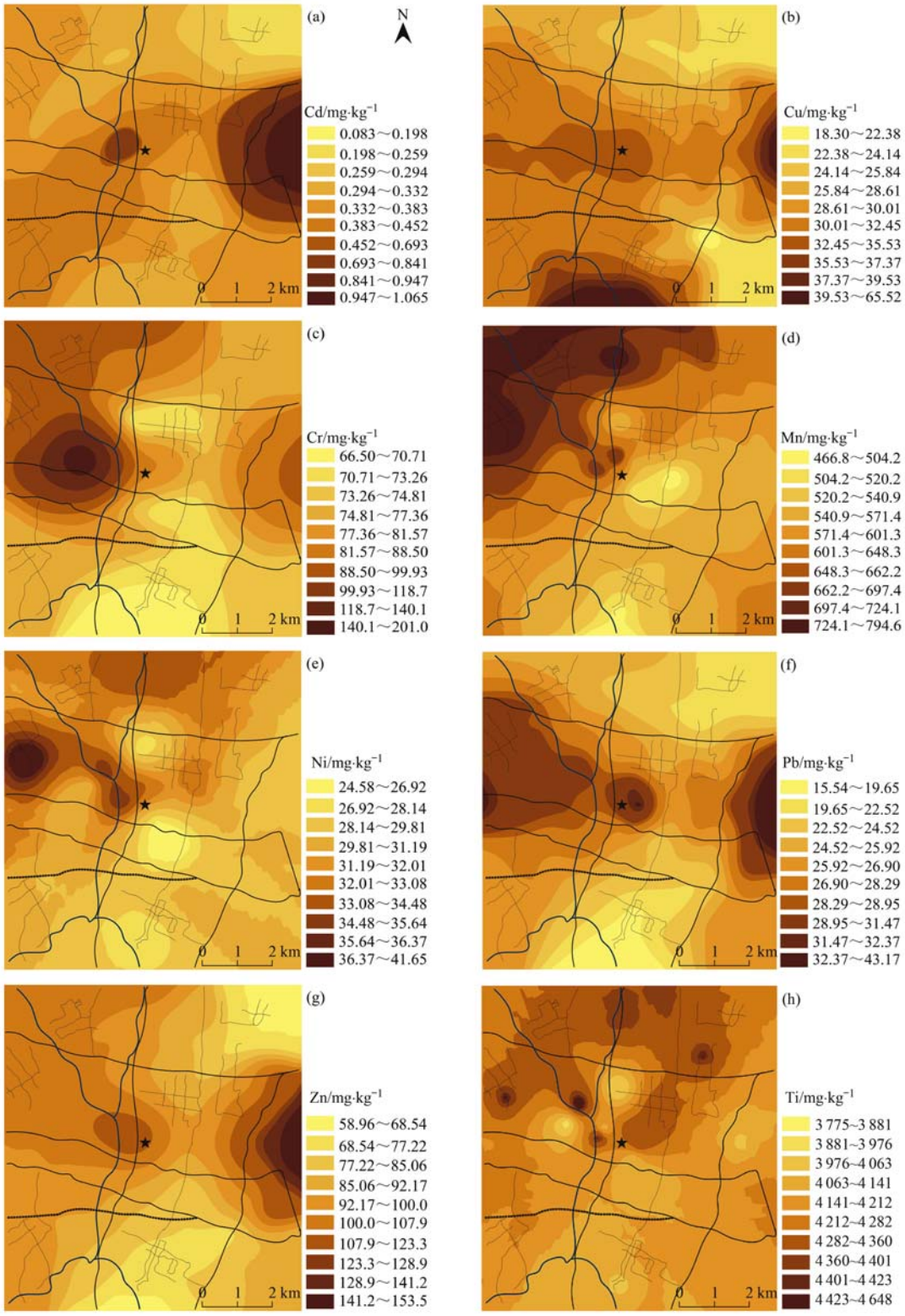

图 4 研究区域重金属含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals in soils in the study area

108.92，表明重金属污染整体上属中等生态风险水平. 尽管如此，该区域重金属 RI 最大值为 269.31，达到高生态风险水平，其主要是因为 Cd 处于高生态风险水平所致. 此外，由图 5 分析可以发现，研究区域内 S1、S4 和 S10 采样点重金属生态风险处于较高水平($120 \leqslant RI < 240$)，S15 处于高生态风险水平($RI \geqslant 240$)，S5 和 S17 处于轻微生态风险水平($RI < 60$)，其余采样点重金属生态风险处于中等水平(60

≤RI < 120). 结合表 2 可知，采样点 S1、S4、S10 和 S15 土壤中 Cd 平均含量分别为 0.743、0.937、0.483 和 1.065 mg·kg^{-1}，分别为背景含量的 5.4、6.8、3.5 和 7.7 倍，且 Cd 对该区域重金属 RI 的贡献率高达 79.63%，表明本研究区域重金属污染程度和潜在生态风险主要是由 Cd 污染所引起的.

表 6　重金属潜在生态风险评价结果

Table 6　Potential ecological risk assessment of heavy metals

重金属	E_r^i								RI
	Cd	Cu	Cr	Mn	Ni	Pb	Zn	Ti	
最小值	18.04	3.36	1.89	0.85	4.11	3.11	0.73	0.88	32.98
最大值	231.52	12.04	5.73	1.45	6.96	8.63	1.89	1.08	269.31
平均值	86.73	5.78	2.43	1.11	5.21	5.47	1.22	0.98	108.92

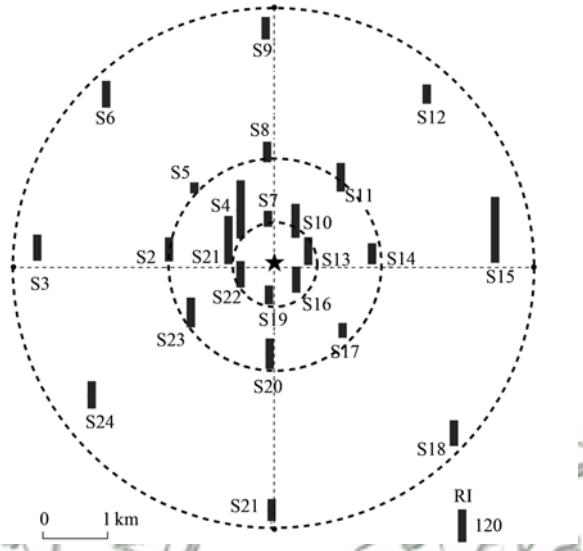

图 5　研究区域土壤重金属综合潜在生态风险指数分布

Fig. 5　Spatial distribution of potential ecological risk index of heavy metals in soils in the study area

3　结论

(1)垃圾焚烧厂周边土壤中共检出 8 种重金属，分别为 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn、Ti 和 Mn，平均含量范围为 0.399 ~ 4 220 mg·kg^{-1}，除 Ti 外，其他 7 种重金属平均含量均高于上海市土壤背景含量，表明周边土壤已存在重金属污染积累.

(2)统计分析结果表明，垃圾焚烧厂周边土壤中重金属 Mn、Ti 和 Ni 主要受成土过程影响；Cd、Cr、Pb、Cu 和 Zn 主要来源于工业生产、交通运输污染和焚烧烟气排放.

(3)垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染处于中等生态风险水平，其中 Cd 对研究区域 RI 贡献率最大，应引起重视.

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2016)[M]. 北京：中国统计出版社，2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[2] 解惠婷，张承中，徐峰，等. 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价[J]. 环境科学，2014，**35**(4)：1523-1530.
Xie H T, Zhang C Z, Xu F, *et al*. Distribution and assessment of mercury in the ambient soil of a municipal solid waste incinerator[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1523-1530.

[3] 钟山，高慧，张漓衫，等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报，2014，**23**(1)：164-169.
Zhong S, Gao H, Zhang L S, *et al*. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in soils surrounding a typical municipal solid waste incineration plant [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(1): 164-169.

[4] 王俊坚，赵宏伟，钟秀萍，等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布[J]. 环境科学，2011，**32**(1)：298-304.
Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, *et al*. Concentration levels and spatial distribution of heavy metals in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant (Shenzhen) [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 298-304.

[5] Bretzel F C, Calderisi M. Contribution of a municipal solid waste incinerator to the trace metals in the surrounding soil [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **182**(1-4): 523-533.

[6] 吕建树，张祖陆，刘洋，等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报，2012，**67**(7)：971-984.
Lv J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al*. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(7): 971-984.

[7] Ololade I A. An assessment of heavy-metal contamination in soils within auto-mechanic workshops using enrichment and contamination factors with geoaccumulation indexes[J]. Journal of Environmental Protection, 2014, **5**(11): 970-982.

[8] 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.

[9] Sakan S M, Đorđjević D S, Manojlović D D, *et al*. Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza river sediments[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(11): 3382-3390.

[10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[11] 徐争启，倪师军，庹先国，等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，2008，**31**(2)：

112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al*. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.

[12] Femández J A, Carballeira A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **40**(4): 461-468.

[13] 马建华, 王晓云, 侯千, 等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, **30**(3): 486-495.
Ma J H, Wang X Y, Hou Q, *et al*. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens[J]. Geographical Research, 2011, **30**(3): 486-495.

[14] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2425-2436.
Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al*. Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2425-2436.

[15] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al*. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1037-1044.

[16] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils[S].

[17] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al*. Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai[J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 599-605.

[18] 孟飞, 刘敏, 史同广. 上海农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 428-433.
Meng F, Liu M, Shi T G, *et al*. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Shanghai [J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 428-433.

[19] Llobet J M, Schuhmacher M, Domingo J L. Spatial distribution and temporal variation of metals in the vicinity of a municipal solid waste incinerator after a modernization of the flue gas cleaning systems of the facility [J]. Science of the Total Environment, 2002, **284**(1-3): 205-214.

[20] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-Mulloli T, *et al*. Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: one source among many[J]. Science of the Total Environment, 2006, **356**(1-3): 207-216.

[21] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al*. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 507-515.

[22] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2355-2363.
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2355-2363.

[23] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4486-4493.
Qi P, Yu S Q, Zhang C, *et al*. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water Sediments from Yongkang[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4486-4493.

[24] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(3): 1500-1507.
Yu M D, Zhang H, He X S, *et al*. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical agricultural soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(3): 1500-1507.

[25] Ma X L, Zuo H, Tian M J, *et al*. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques[J]. Chemosphere, 2016, **144**: 264-272.

[26] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(6): 1013-1021.
Zhao X, Huang Y, Li J, *et al*. Environmental levels, spatial distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste incinerator[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(6): 1013-1021.

[27] Bentum J K, Anang M, Boadu K O, *et al*. Assessment of heavy metals pollution of sediments from Fosu lagoon in Ghana [J]. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia, 2011, **25**(2): 191-196.

[28] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, **25**(1): 65-72.
Zhang X Z, Bao Z Y, Tang J H, *et al*. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, **25**(1): 65-72.

[29] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, eastern China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.

[30] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al*. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, northeast China [J]. Chemosphere, 2013, **92**(5): 517-523.

[31] Facchinelli A, Saechi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **114**(3): 313-324.

[32] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.

[33] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al*. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **78**: 2-8.

[34] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z N, *et al*. Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1887-1894.

[35] 李洋, 陈卫锋, 魏然, 等. 闽江福州段沉积物中重金属的分布特征及其毒性和生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1792-1799.
Li Y, Chen W F, Wei R, *et al*. Distribution characteristics, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments of Minjiang River in Fuzhou City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(5): 1792-1799.

[36] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 土壤, 2010, **42**(6): 928-934.
Wang J, Zhang H, Zeng X B, *et al*. Distribution and pollution assessment on heavy metals in urban soils of Guiyang[J]. Soils, 2010, **42**(6): 928-934.

[37] 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.

[38] Van Bohemen H D, Van De Laak W H J. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water, and air quality[J]. Environmental Management, 2003, **31**(1): 50-68.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 12

Dec. 15, 2017

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji Region, 2015 ····· WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, *et al.* (4897)

Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks ····· XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, *et al.* (4905)

Space-Time Estimations and Mapping of $PM_{2.5}$ Fine Particulates Based on Multi-source Data ····· XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, *et al.* (4913)

Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of $PM_{2.5}$ in East China ····· YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, *et al.* (4924)

Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing ····· ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, *et al.* (4932)

Seasonal Variation of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Heze ····· LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, *et al.* (4943)

Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ in Selected Cities in Liaoning Province ····· ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, *et al.* (4951)

Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin ····· YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, *et al.* (4958)

Physico-chemical Characteristic Analysis of $PM_{2.5}$ in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming ····· WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, *et al.* (4968)

Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 ····· DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, *et al.* (4976)

Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus ····· LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, *et al.* (4983)

Influence of ENSO Events on the Hydrogen (δ^2H) and Oxygen ($\delta^{18}O$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai ····· DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, *et al.* (4991)

Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China ····· CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, *et al.* (5004)

Spatial and Temporal Variability of CO_2 Emissions from the Xin'anjiang Reservoir ····· YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, *et al.* (5012)

Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, *et al.* (5020)

Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir ····· CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, *et al.* (5032)

Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas: A Case in the Taizi River Basin ····· LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)

Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall: A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin ····· LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, *et al.* (5047)

Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain ····· MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, *et al.* (5056)

Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model ····· XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)

Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing ····· CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, *et al.* (5074)

Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen ····· LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, *et al.* (5081)

Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems ····· LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, *et al.* (5090)

Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter ····· LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, *et al.* (5097)

Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent ····· LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, *et al.* (5106)

Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water ····· GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, *et al.* (5116)

MIL-88A@ MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate ····· WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, *et al.* (5124)

Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature ····· XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)

Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolital ····· CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, *et al.* (5139)

Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (5146)

Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater ····· LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, *et al.* (5154)

Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater ····· ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (5162)

Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process ····· SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, *et al.* (5169)

Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an ····· KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (5174)

Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX ····· WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, *et al.* (5184)

Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF Systemand Evolution Properties of Microorganisms ····· YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, *et al.* (5192)

Enrichment of *Nitrospira* in Activated Sludge and Kinetic Characterization ····· YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, *et al.* (5201)

Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate ····· ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)

Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor ····· ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (5215)

Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitritation in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR ····· SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, *et al.* (5222)

Long-term Impacts of TiO_2 Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor ····· LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)

Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta ····· ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, *et al.* (5237)

Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers ····· ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, *et al.* (5247)

Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir ····· HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, *et al.* (5256)

Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai ····· GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, *et al.* (5262)

Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City ····· SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, *et al.* (5272)

Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area ····· YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, *et al.* (5282)

Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai ····· ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, *et al.* (5292)

Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants ····· GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, *et al.* (5299)

Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice ····· SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, *et al.* (5308)

Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield ····· ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, *et al.* (5315)

Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, *et al.* (5326)

Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N_2O Emission in the North China Plain ····· SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, *et al.* (5333)

Flux Characteristics of CO_2, CH_4, and N_2O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain ··· FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, *et al.* (5344)

Review of CO_2 and CH_4 Emissions from Rivers ····· WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, *et al.* (5352)