

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响

许萌萌¹, 刘爱凤¹, 师荣光^{2*}, 蓝靖³, 田永¹, 赵宗山¹

(1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 生物基材料重点实验室, 青岛 266101; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 青岛农业大学化学与药学院, 青岛 266109)

摘要: 降雨过程对农田土壤重金属的淋洗效应是影响重金属在土壤中迁移与转化的重要过程. 本文不仅考察了天津市污灌区农田表层土壤中 7 种重金属的含量水平和空间分布特征, 还结合之前发表的地表径流中重金属含量数据, 探讨了自然界降雨对土壤重金属的淋洗作用. 多元分析结果表明, 农田土壤中各种金属含量差异较大. 其中 Zn 含量最高 [$(106.61 \pm 56.24) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], Cd 含量最低 [$(0.31 \pm 0.31) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], 但 Cd 含量 4 倍于当地土壤背景值 ($0.090 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 7 种土壤重金属综合污染指数排序为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{As} \approx \text{Cr} > \text{Pb}$. 土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 分别属于中度污染、轻度污染和警戒水平, 而 As、Cr 和 Pb 均属于安全等级. 多元分析结果还表明, 研究区内土壤 Cd 主要来源于人为活动, 包括工业及机动车排放、污水灌溉等, Zn、Cu、Cr、Ni 和 Pb 受人为源和自然源的综合影响, 而 As 则主要为自然源. 降雨过程对土壤中 7 种重金属的浸出情况排序为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} \approx \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} \approx \text{Zn}$. 综上, 天津市土壤 Cd 污染较为突出, 需要进行重点监测及专项治理.

关键词: 重金属; 农田土壤; 降雨径流; 天津市郊; 多元分析

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1095-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201706213

Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin

XU Meng-meng¹, LIU Ai-feng¹, SHI Rong-guang^{2*}, LAN Jing³, TIAN Yong¹, ZHAO Zong-shan¹

(1. Key Laboratory of Biobased Materials, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 2. Agro-Environment Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3. College of Chemistry and Pharmaceutical Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: The leaching effect of the rainfall process for removing heavy metals from farmland soils is a critical physical process. To study the leaching effect of the rainfall process on heavy metals in soil, the pollution characteristics of seven heavy metals in farmland soil have been investigated in the suburban Tianjin region by combining the current data with previously reported runoff data in the same region. There is a large difference for these tested heavy metals in soils, with Zn having the highest concentration at $106.61 \pm 56.24 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and Cd having the lowest concentration at $0.31 \pm 0.31 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Compared with the background value in Tianjin, only the content of Cd is at higher levels (a four-fold increase). The results from a single factor pollution index and comprehensive pollution index analysis indicate that the comprehensive pollution index ranking is $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{As} \approx \text{Cr} > \text{Pb}$. Cd, Cu, Ni, and Zn are in the moderate pollution, mild pollution, and alert level categories, respectively. Except for As, the results from a correlation analysis, the principal component analysis (PCA), and the cluster analysis indicate the possible similar origins of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb. The multivariate statistical analysis indicates that Cd is mainly derived from human activities, Zn, Cu, Cr, Ni, and Pb are affected by anthropogenic and natural sources, and As is mainly influenced by natural conditions. By comparing the ratios of individual heavy metals to Cr in soils and runoffs, the leaching behaviors have been studied, with the leaching capacity ranked as $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} \approx \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} \approx \text{Zn}$. In summary, Cd pollution in soil is more prominent than pollution from other metals and should receive attention.

Key words: heavy metal; farmland soil; rainfall runoff; Tianjin suburb region; multivariate analysis

重金属是土壤主要的污染物之一, 主要来源于工业“三废”的排放、农田污水的灌溉、农药化肥的施用及大气沉降等^[1~4], 并且在土壤中长期存在, 难以降解, 而且可以通过食物链产生生物富集效应并对生物产生危害. 城市郊区作为城市与农村的过渡区域, 农业生产化活动高、土地利用也较复杂, 受到城市化、工业化和农村的多重影响, 使得城郊农田土壤的重金属污染程度日益严重^[5~7].

降雨对土壤污染物具有一定的淋溶作用. 作为土壤与水体间物质交换的一种重要方式, 降雨产生

的雨水径流中的悬浮颗粒物通常是土壤有机污染物、重金属等的主要载体^[8,9]. 重金属受到降水淋溶或地表径流作用, 进入地表水和地下水, 影响水生生物的生存, 加重了水体重金属污染. 研究表明, 降雨引起的径流是造成水体非点源污染的重要

收稿日期: 2017-06-21; 修订日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21477138); 中国博士后科学基金项目(2016M602210)

作者简介: 许萌萌(1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境污染物监测, E-mail: xumm@qibebt.ac.cn

* 通信作者, E-mail: winsomesky@163.com

原因^[10-12].

鉴于此,本文以中国北方典型重工业城市——天津郊区农田为例,研究实际降雨条件下,土壤中7种常见重金属的含量及分布特征,通过对土壤重金属含量多元分析,探讨重金属的来源,并结合之前发表的降雨径流中重金属数据,对7种重金属的浸出程度进行了探讨,以期为后续深入研究降雨的淋溶效应提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天津市作为中国四大直辖市之一,工业、制造业、农业等发达,地处华北平原东北部,为环渤海湾中心和北方国际航运核心区.天津属温带季风气候,

四季分明,降雨主要集中在每年的6~8月份,年平均降雨量577.8 mm^[6].天津水资源短缺,部分农田采用污水进行灌溉.本文选取污灌区农田作为土壤和雨水径流的采样区域,详见图1,区域介于北纬38.83°~39.17°和东经116.91°~117.38°之间.土壤与径流样品采样时间为2007年9月至2008年9月.

1.2 样品采集

土壤样品采用网格布点和随机布点相结合的方式进行采集,通过土壤采集器采集0~20 cm的表层土壤,样品共104个,分别标记并包装.经室温风干、研磨、过100目筛后,放入-20℃冰柜中储存备用.径流样品(62个)数据来自之前天津地区的报道^[6,13].

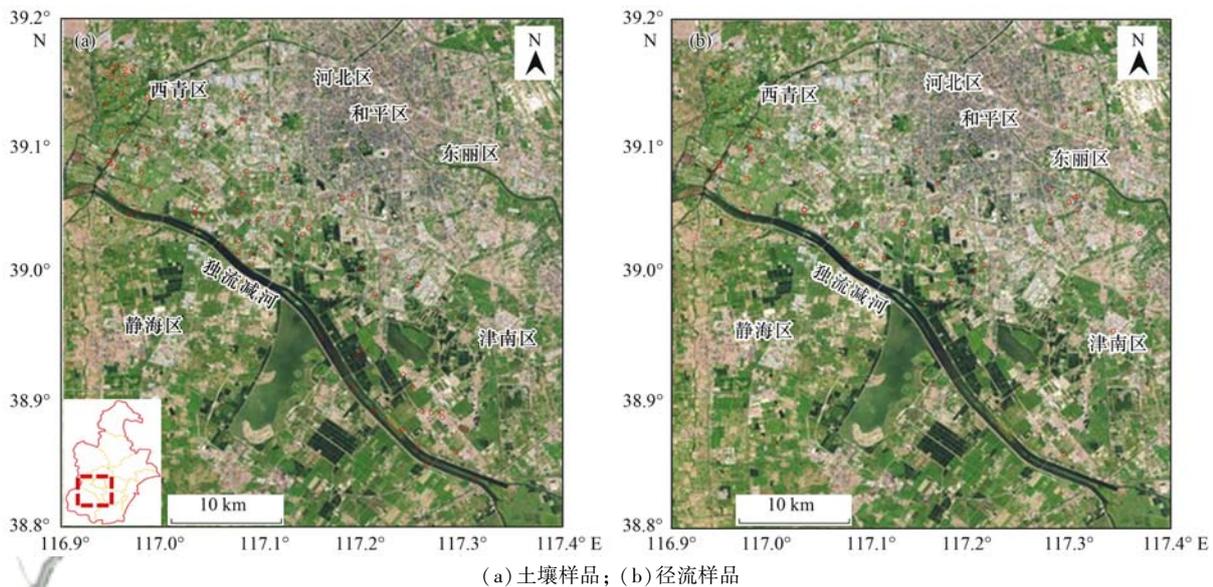


图1 研究区地理位置及采样点示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.3 样品分析

土壤颗粒物及径流样品悬浮物:样品采用HCl + HNO₃ + HClO₄ + HF联合消解法消解,赶酸,消解溶液经0.45 μm滤膜过滤后定容,通过ICP-MS测定7种重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb)的含量.径流样品水体部分则直接经0.45 μm滤膜过滤后与悬浮物部分进行混合后,通过ICP-MS进行7种重金属的定量分析.

1.4 土壤重金属污染评价方法

以中国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中二级限量值作为污染评价参考值^[14](表1),采用目前国内外普遍使用的单因子污染指数法[式(1)]和内梅罗综合污染指数法[式(2)],对土壤中7种重金属污染进行评估^[15,16].其中,单因子指数法适用

于单一因子污染特定区域的评价,而内梅罗综合指数法能够较为综合、全面地反映土壤的污染程度.

$$P_i = c_i / S_i \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = [0.5(c_i/S_i)_{\text{mean}}^2 + 0.5(c_i/S_i)_{\text{max}}^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中, P_i 为土壤中污染物*i*的环境质量指数; c_i 为土壤中污染物*i*的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S_i 为污染物*i*的污染评价参考值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本文采用的是《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中二级限量值; $P_{\text{综}}$ 为土壤重金属*i*的综合污染指数.根据*P*值变幅,结合作物受害程度和污染物积累状况划分土壤质量分级: $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为安全, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ 为警戒线, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ 为中度污染, $P_{\text{综}} > 3$ 为重度污染^[16].

1.5 数据分析

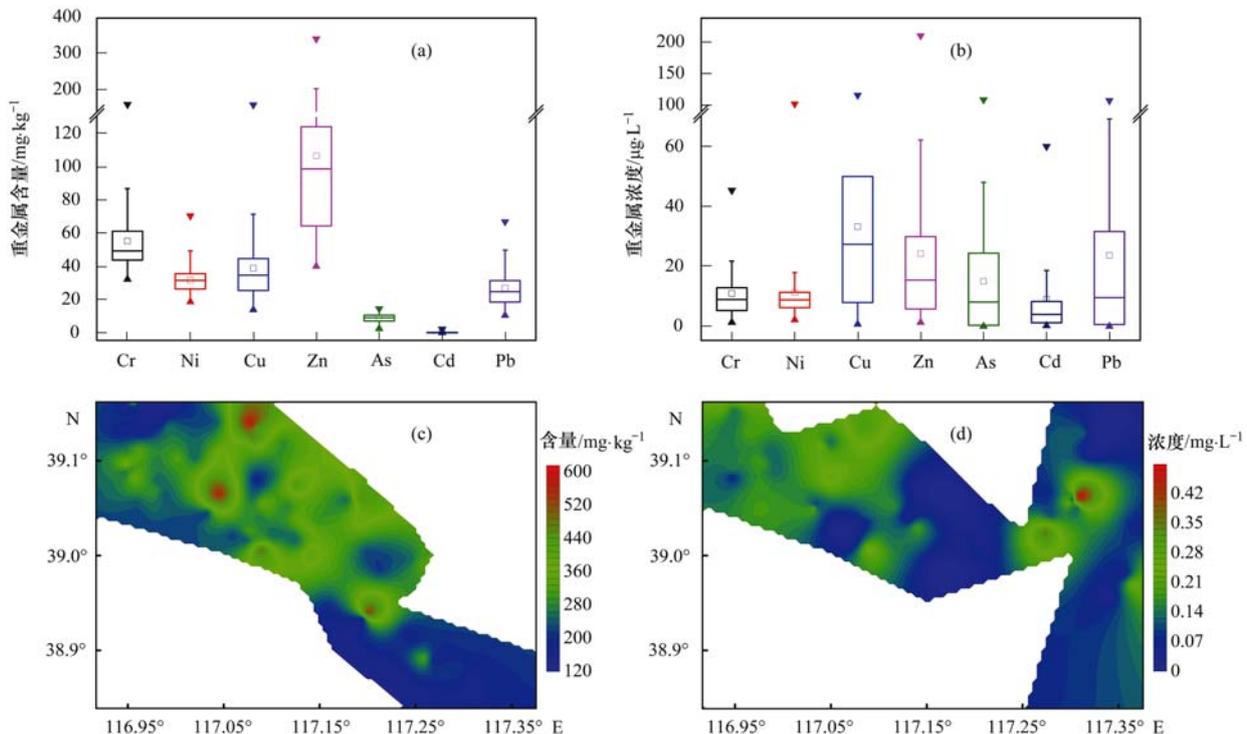
利用 Origin 9.0 软件进行重金属含量箱式图的绘制; 利用 Surfer 8.0 软件绘制重金属含量的经纬度分布图; 利用 IBM SPSS statistics 20 软件进行数据的多元统计分析, 包括相关性分析、主成分分析和聚类分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤和雨水径流中重金属含量分析

图 2(a) 和 2(b) 为土壤和径流样品中 7 种重金属含量箱式图。表 1 为研究区土壤重金属含量统计值。其中, Zn 含量最高 $[(106.61 \pm 56.24) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 其次为 Cr $[(55.36 \pm 19.55) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 、Cu $[(38.99 \pm 20.47) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 、Ni $[(31.91 \pm$

$7.38) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和 Pb $[(26.95 \pm 11.24) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 而 As $[(8.70 \pm 2.83) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和 Cd $[(0.31 \pm 0.31) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 含量较低。采样点各重金属含量与北京郊区某农田土壤相比偏高 [As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的含量分别为 (7.85 ± 2.13) 、 (0.136 ± 0.061) 、 (22.4 ± 6.31) 、 (0.073 ± 0.049) 、 (20.4 ± 5.2) 和 $(69.8 \pm 16.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$]^[15]。从变异系数来看, Cd、Cu 和 Zn 的数值较大, 反映出这 3 种重金属受人类活动的影响较大。研究区内土壤 Cd 含量则是中国和天津土壤背景值^[17]的 4 倍, Zn、Cu 的含量约为中国和天津市的土壤背景值的 1.5 倍, 而土壤中 Cr、Ni、As 和 Pb 的含量水平与世界、中国及天津的土壤重金属背景值相比略低或相当, 表明研究区内受 Cd 污染较为严重。



(a) 和 (c) 为土壤重金属数据; (b) 和 (d) 为径流重金属数据, 径流数据来自文献[6]

图 2 土壤和径流中 7 种重金属含量箱式图和 7 种重金属总含量的经纬度分布

Fig. 2 Box plots of the contents of the seven metals and distribution maps of the contents of the seven metals in soil and runoff

表 1 研究区土壤重金属含量统计值及各地土壤重金属元素背景值¹⁾

Table 1 Statistic for the contents of soil heavy metals of the study area and background values of soil heavy metals in different districts

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	32.29	18.74	13.91	40.16	2.64	0.077	10.55
最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	159.79	70.50	158.45	339.9	14.6	2.37	66.98
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	55.36	31.91	38.99	106.61	8.70	0.31	26.95
标准偏差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	19.55	7.38	20.47	56.24	2.83	0.31	11.24
变异系数	0.35	0.24	0.52	0.53	0.33	1.02	0.42
世界土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	70	50	30	9.0	6.0	0.35	35
中国土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	61	26.9	22.6	74.2	11.2	0.097	26
天津土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	84.2	33.3	28.8	79.3	9.6	0.090	21

1) 3 种土壤背景值均来自于国家环境保护总局颁布的中国土壤元素背景值

以中国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中二级限量值作为污染评价参考值, Cd、Cu、Zn 和 Ni 均超出了二级限量值, 超标率分别为 9.6%、1.9%、1.9% 和 1.0%。以二级限量值作为污染评价参考值, 得到的土壤重金属综合污染指数排序为 Cd > Cu > Ni > Zn > As ≈ Cr > Pb, 具体数据详见表

表 2 7 种重金属的国标二级限量值、单因子污染指数和综合污染指数¹⁾

Table 2 Limitation values of the second level of the national standard, single factor pollution indexes, and comprehensive pollution indexes of the seven heavy metals

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
$S_i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	250	60	100	300	25	0.6	350
P_{mean}	0.22	0.53	0.39	0.36	0.35	0.52	0.08
P_{max}	0.64	1.18	1.58	1.13	0.58	3.94	0.19
$P_{\text{综}}$	0.48	0.91	1.15	0.84	0.48	2.81	0.15

1) S_i 为污染物 i 的污染评价参考值; P_{mean} 为土壤中某种重金属的环境质量指数平均值; P_{max} 为土壤中某种重金属的环境质量指数最大值; $P_{\text{综}}$ 为土壤某种重金属的综合污染指数

重金属在不同站位的含量值差异较大, 呈现明显的斑点状分布特征. 这主要由于农田本身污染状况差异、与污染源排放点距离及土地利用方式不同引起的^[20]. 同一采样点的不同重金属含量差异较大, 如某一采样点 Cr、Zn、As 和 Cd 的含量分别为 47.99、91.52、12.50 和 0.226 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其含量的标准偏差及差异系数均较大, 说明天津市污灌区农田土壤重金属污染差异较大^[19].

通过对比图 2(c) 和 2(d) 可以看出, 与土壤样品相比, 各采样点的径流重金属总含量虽然也存在差异, 但是这种差异相对较小. 这可能是由于各重金属从土壤中的析出程度、土壤性质^[19]、干旱期、雨水冲刷强度^[20] 和地表径流的混合作用引起的. 在径流样品中, Cu [(33.45 ± 28.62) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 的质量浓度最高, Zn [(24.57 ± 35.38) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]、Pb [(23.18 ± 30.30) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 和 As [(15.33 ± 19.39) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 略低, Ni [(11.27 ± 13.17) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]、Cr [(11.03 ± 8.69) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 和 Cd [(9.22 ± 13.49) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 较小^[6]. 与土壤样品不同, 径流中 Cr 的质量浓度在 7 种重金属中处于相对较低的水平, 原因

2. 其中, 土壤 Cd 处于中度污染水平、Cu 处于轻度污染水平、Ni 和 Zn 处于警戒水平, 而 As、Cr 和 Pb 均属于安全等级. 由上述结果可以得出, 重金属 Cd 对农田土壤的生态风险最大, 该结论与已有研究的结论一致^[18,19].

图 2(c) 为土壤重金属总含量的空间分布图,

可能是 Cr 在土壤中主要以残渣晶格态和有机结合态存在, 水溶性 Cr 含量较低^[21].

2.2 土壤重金属多元统计分析

2.2.1 土壤重金属相关性分析

相关性分析通过对两个或多个具备相关性的变量进行分析, 可以衡量两个变量之间的相关密切程度. 通过对采样点农田土壤中重金属含量的相关性进行分析, 可以检验土壤重金属的来源是否一致. 若两种重金属含量呈现相关或显著相关的关系, 则说明两者可能来自同一污染源; 反之, 则表明两者来源不同. 表 3 为土壤中 7 种重金属相关性分析结果, 从中可以看出, Ni-Cr (0.595)、Cu-Cr (0.473)、Cu-Ni (0.432)、Zn-Cr (0.412)、Zn-Ni (0.389)、Zn-Cu (0.686)、Pb-Cr (0.499)、Pb-Ni (0.498)、Pb-Cu (0.699)、Pb-Zn (0.755)、Cd-Cr (0.687)、Cd-Ni (0.496)、Cd-Cu (0.632)、Cd-Zn (0.598)、Cd-Pb (0.753) 均呈现显著相关关系 ($P < 0.01$). 而 As 除了与 Cr 具有一定的负相关关系 (-0.201) 外, 与其它 5 种重金属元素均不相关.

表 3 土壤中 7 种重金属含量的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient of the contents of the seven heavy metals in soil

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Cd
Cr	1.000						
Ni	0.595 **	1.000					
Cu	0.473 **	0.432 **	1.000				
Zn	0.412 **	0.389 **	0.686 **	1.000			
As	-0.201 *	0.027	0.156	0.128	1.000		
Pb	0.499 **	0.498 **	0.699 **	0.755 **	-0.112	1.000	
Cd	0.687 **	0.496 **	0.632 **	0.598 **	-0.181	0.753 **	1.000

1) * 表示相关 ($0.01 < P < 0.05$), ** 表示显著相关 ($P < 0.01$)

2.2.2 土壤重金属主成分分析

本文在对农田土壤重金属数据进行主成分分析前,对数据进行了 KMO 和 Bartlett 检验, KMO 值为 0.785, 根据 Kaiser 标准, 基本适合主成分分析; Bartlett 值为 401.144, P 值 (Sig. = 0.000) < 0.05, 可以拒绝 Bartlett 球形检验的零假设, 数据基本适合主成分分析. 由此可知, 采用主成分分析法来分析农田土壤重金属含量理论上可行.

表 4 为研究区农田土壤重金属含量的主成分分

表 4 农田土壤重金属主成分分析

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	3.893	55.616	55.616	3.893	55.616	55.616	3.884	55.480	55.480
2	1.202	17.178	72.793	1.202	17.178	72.793	1.212	17.314	72.793
3	0.776	11.081	83.875						
4	0.414	5.916	89.791						
5	0.300	4.287	94.077						
6	0.263	3.758	97.835						
7	0.152	2.165	100.000						

表 5 农田土壤重金属主成分分析成分矩阵

Table 5 Component matrices of the principal component analysis of heavy metal contents in farmland soil

重金属	成分矩阵		旋转成分矩阵	
	1	2	1	2
Cr	0.752	-0.342	0.731	-0.386
Ni	0.686	-0.058	0.681	-0.099
Cu	0.817	0.306	0.834	0.257
Zn	0.802	0.312	0.819	0.264
As	-0.055	0.924	0.000	0.926
Cd	0.873	-0.190	0.861	-0.242
Pb	0.884	0.016	0.883	-0.036

2.2.3 土壤重金属聚类分析

为了更全面地分析研究区内农田土壤中 7 种重金属的关系, 进行了土壤重金属的聚类分析. 由图 3 可以看出, 聚类分析结果与相关性分析和主成分分析结果基本一致, 重金属元素可以分为三类: Zn、Pb、Cu、Cr 和 Cd 为第一类, Ni 为第二类, As 为第三类, 其中, 第一类和第二类可以组成一大类.

2.3 土壤重金属来源分析

土壤重金属元素相关性分析结果表明 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 之间的同源性很高, As 来源与其余 6 种重金属不同. 主成分分析和聚类分析结果则进一步证实了 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 这 6 种重金属具有相同或相近的污染来源.

由于天津地处环渤海经济圈内, 电镀、机械、橡胶等工业较为发达, 而 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb

析结果. 从中可以看出, 前两个提取因子的初始特征值超过 1, 且解释方差大于 10%, 对应的累计贡献率达到了 72.79%, 基本可以作为主成分进行因子提取. 由表 5 可以看出, 在因子的初始矩阵和旋转成分矩阵中, Cr (0.731)、Ni (0.681)、Cu (0.834)、Zn (0.819)、Cd (0.861) 和 Pb (0.883) 在第一主成分中均显示了较高的值, 整体贡献率为 55.48%. 而第二主成分集中反映了 As (0.926) 的作用, 其贡献率占比为 17.31%.

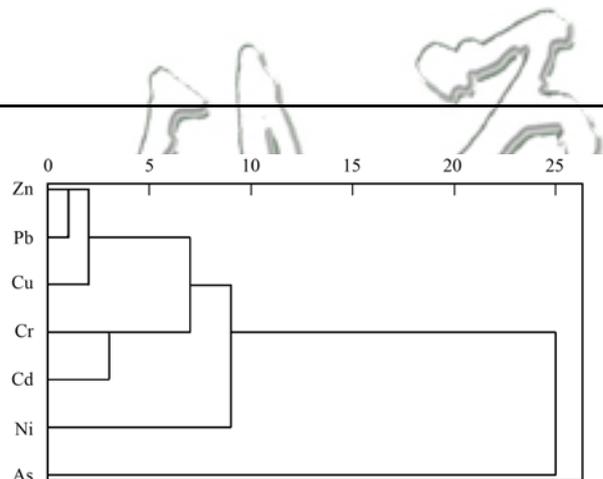


图 3 天津污灌区农田土壤重金属元素的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of heavy metal elements of farmland soil in a sewage irrigation area in Tianjin

等重金属通常被认为是电镀等工业行业及机动车污染的特征污染物^[22,23]. 另外, 研究区为天津污灌区, 具有多年污水灌溉和污泥填埋的历史^[24], 而传统的污水处理过程对有机污染物的去除较为有效, 对重金属的去除效果不明显, 使得大量重金属可以通过农业灌溉进入农田系统^[25]. 由于土壤中 Cd 含量明显高于当地的背景值, 人为源(工业来源、交通来源、污水灌溉等)可能是土壤中 Cd 的主要来源. Zn、Cu、Cr、Ni、Pb 与天津土壤背景污染值相比偏高或相当, 人为(工业来源、交通来源及污水灌溉)和自然(土壤地质)来源对土壤中的这些重金属均有贡献. 研究区内土壤 As 含量与中国和天津市土壤背景值较为一致, 且变异系数相对其他重金属元素较小, 土壤中 As 的分布较为均匀, 主要受

区域地质背景控制^[26]。

2.4 降雨对土壤重金属的浸出程度对比

为了探讨各重金属在降雨过程中的淋溶特征, 本文通过比较土壤和径流中重金属比值(统一为其它6种重金属与Cr的比值), 对比分析了自然降雨对土壤重金属浸出效应。图4为土壤和径流中其余6种金属与Cr的比值和比值对数箱式图, 其中黑色箱体代表土壤样品、红色箱体代表径流样品。降雨过程中7种重金属从土壤中的浸出率排序为 $Cd > As > Cu \approx Pb > Ni > Cr \approx Zn$ 。以 Cd/Cr 和 Pb/Cr 两组比值为例, Cd/Cr 在土壤和径流中的比值相差90倍, 而 Pb/Cr 在径流样品中的比值仅为土壤样品的5.6倍, 这表明 Cd 的浸出率明显高于 Pb 。这是由于 Cd 易迁移、在自然雨水或酸雨等介质条件下 Cd 更容易从土壤中淋滤并进入到水体中^[19], 污染水

体及周边环境, 进而对当地的人体健康和生态系统产生危害。浸出率的不同可能与降雨的 pH ^[27]、金属在土壤中的存在方式(残留态、交换态、结合态等)^[21]及土壤性质有关^[19]。另外, Ni 、 Cr 和 Zn 的浸出率比较接近, 可能与它们的来源相同或相近有关。

综上, 虽然土壤中 Cd 在土壤中的绝对含量处于较低水平, 但与天津的土壤重金属背景值和《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中二级限量值相比, 土壤 Cd 的超标情况最为严重, 综合污染指数亦最高, 表明 Cd 对土壤的污染最为严重。另外, 在实际降雨过程中, Cd 的浸出效率最高, 说明该土壤中 Cd 最易从土壤中迁移到水体中, 进而污染水体。因此, 对当地土壤中 Cd 进行重点监测及治理是十分重要的。

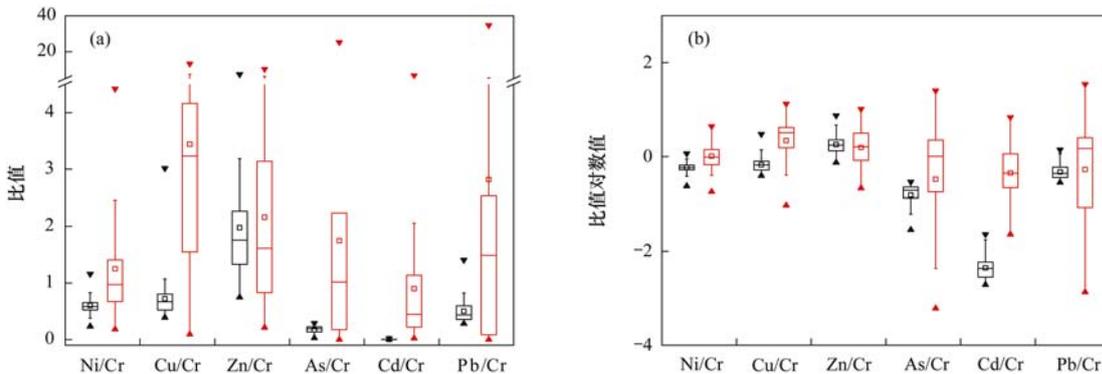


图4 土壤和径流中其余6种金属与Cr的含量比值和比值对数值箱式图
(a)两种重金属含量的比值; (b)两种重金属含量的比值对数值; 其中, 黑色箱体代表土壤样品, 红色箱体代表径流样品, 径流数据来自文献[6]

图4 土壤和径流中其余6种金属与Cr的含量比值和比值对数值箱式图

Fig. 4 Ratios and the logarithms of concentrations of six metals and Cr in soil and runoff

3 结论

(1) 农田土壤中 Zn 、 Cr 和 Cu 含量较高, 土壤中 Cd 平均含量为天津市土壤环境背景值的4倍, Zn 、 Cu 含量为背景值的1.5倍, 其它重金属则比背景值相当。土壤 Cd 、 Cu 、 Ni 和 Zn 分别属于中度污染、轻度污染和警戒水平, 而 As 、 Cr 和 Pb 均属于安全等级。

(2) 多元统计分析结果表明 Cd 主要来源于人为源(工业及机动车排放、污水灌溉等), Zn 、 Cu 、 Cr 、 Ni 和 Pb 受人为源和自然源的综合影响, 而 As 则主要受自然条件影响。

(3) 降雨过程7种重金属的土壤浸出情况排序为 $Cd > As > Cu \approx Pb > Ni > Cr \approx Zn$ 。

(4) 相较于其余6种重金属, Cd 在土壤中污染最为严重, 且其在实际降雨过程中更易转移至水体中,

因此需要对当地土壤中的 Cd 进行重点监测及治理。

参考文献:

- [1] Zhang H, Yao Q S, Zhu Y M, *et al.* Review of source identification methodologies for heavy metals in solid waste[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(2): 162-168.
- [2] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, *et al.* Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives [J]. Chemosphere, 2017, **171**: 710-721.
- [3] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 270-279.
- [4] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(3): 487-495.
Ning C P, Li G C, Wang Y H, *et al.* Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in Xihe watershed

- farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(3): 487-495.
- [5] Yan H, Shengyuan Y, Li M Y, *et al.* Evaluation of heavy metal contamination in agricultural topsoils in suburban Xuchang City, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(3): 2475-2480.
- [6] 师荣光, 蔡彦明, 郑向群, 等. 天津郊区农田降雨径流重金属的污染特征及来源分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, **25**(5): 213-217.
Shi R G, Cai Y M, Zheng X Q, *et al.* Contamination characteristics and source analyses on heavy metals in farmland runoff of the Tianjin suburban areas[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(5): 213-217.
- [7] 胡孙, 袁旭音, 陈红燕, 等. 城郊农业土壤重金属不同尺度空间分布及源分析——以宁镇交界带为例[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(12): 2295-2303.
Hu S, Yuan X Y, Chen H Y, *et al.* Multi-scale spatial distribution and source discrimination of heavy metals in suburb soils: a case study of junctional zone between Nanjing city and Zhenjiang city[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(12): 2295-2303.
- [8] 欧锦文. 苏州城市河道非点源污染削减措施研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014. 1-3.
Ou J W. Research on non-point source pollution reduction measures of city river in Suzhou[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014. 1-3.
- [9] 张文婷, 王铭泽, 宋丹阳, 等. 降雨径流过程的非点源污染时空动态分布研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(10): 153-160.
Zhang W T, Wang M Z, Song D Y, *et al.* Study on spatial distribution of non-point source pollution in the process of rainfall runoff[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **38**(10): 153-160.
- [10] Zheng Y, Luo X L, Zhang W, *et al.* Transport mechanisms of soil-bound mercury in the erosion process during rainfall-runoff events[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **215**: 10-17.
- [11] Luo X L, Zheng Y, Lin Z R, *et al.* Evaluating potential non-point source loading of PAHs from contaminated soils: a fugacity-based modeling approach[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **196**: 1-11.
- [12] Zheng Y, Luo X L, Zhang W, *et al.* Enrichment behavior and transport mechanism of soil-bound PAHs during rainfall-runoff events[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **171**: 85-92.
- [13] 师荣光, 郑向群, 孙玉芳, 等. 不同土地利用类型下降雨径流重金属 Cd 的生态风险分析[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(3): 106-109.
Shi R G, Zheng X Q, Sun Y F, *et al.* Ecological risk analysis of heavy metal in rainfall runoff under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(3): 106-109.
- [14] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2152-2159.
Chen T, Chang Q R, Liu J, *et al.* Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(11): 2152-2159.
- [15] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **425**: 66-74.
- [16] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 260-265.
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 260-265.
- [17] 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. 87-90, 330-379, 496.
- [18] Niu L L, Yang F X, Xu C, *et al.* Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **176**: 55-62.
- [19] 张家泉, 李秀, 张全发, 等. 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 194-201.
Zhang J Q, Li X, Zhang Q F, *et al.* Transportation and risk assessment of heavy metal pollution in water-soil from the riparian zone of Daye Lake, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 194-201.
- [20] Prestes E C, dos Anjos V E, Sodr  F F, *et al.* Copper, lead and cadmium loads and behavior in urban stormwater runoff in Curitiba, Brazil[J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2006, **17**(1): 53-60.
- [21] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
Wang L J, Lu X W, Lei K, *et al.* Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji City [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- [22] Mart n-Lara M A, Bl zquez G, Trujillo M C, *et al.* New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **81**: 120-129.
- [23] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [24] 李晓婧, 郑向群, 郑顺安. 污灌区盐渍化土壤重金属 Cd 的形态分析及其影响因素[J]. *中国农学通报*, 2017, **33**(12): 43-47.
Li X J, Zheng X Q, Zheng S A. Soil heavy metal Cd in sewage-irrigated saline soil: chemical forms and influencing factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(12): 43-47.
- [25] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [26] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 993-1001.
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 993-1001.
- [27] Yun S W, Yu C. Immobilization of Cd, Zn, and Pb from soil treated by limestone with variation of pH using a column test[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, **2015**: 641415.

CONTENTS

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