

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)
南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)
青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)
南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)
边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)
电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)
2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)
APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋铁锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)
氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)
纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)
3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)
Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)
3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)
应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)
《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响

周益奇, 刘云霞, 傅慧敏

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 城市化的加快, 使缺水问题更为普遍, 中水用于公厕和绿地浇灌将是未来的趋势. 为研究特殊行业污水处理后用于绿地浇灌对土壤的重金属污染状况, 选取以生活污水和实验室污水为水源, 一体式氧化沟为处理单元的出水为浇灌用水, 以包括阔叶林、灌木和草坪的小区土壤作为研究对象; 采集 6 个样品点 0~20 cm 深的土壤进行 Cr、Mn 等 8 种重金属检测. 结果表明, 与自来水浇灌土壤对比, 中水浇灌土壤的重金属含量没有显著差异; 中水浇灌土壤的重金属主要在表层富集, 其中铬、镍、铜、锌、铅浓度低于北京市土壤背景值; 浇灌土壤中砷和镉存在轻度污染, 值得关注.

关键词: 中水; 土壤; 重金属; 影响

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0288-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.01.037

Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil

ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: With acceleration of urbanization, water shortages will become a serious problem. Usage of reclaimed water for flushing and watering of the green areas will be common in the future. To study the heavy metal contamination of soils after green area irrigation using recycled wastewater from special industries, we selected sewage and laboratory wastewater as water source for integrated oxidation ditch treatment, and the effluent was used as irrigation water of the green area. The irrigation units included broad-leaved forest, bush and lawn. Six samples sites were selected, and 0-20 cm soil of them were collected. Analysis of the heavy metals including Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb in the soil showed no significant differences with heavy metals concentration in soil irrigated with tap water. The heavy metals in the soil irrigated with recycled water were mainly enriched in the surface layer, among which the contents of Cr, Ni, Cu, Zn and Pb were below the soil background values of Beijing. A slight pollution of As and Cd was found in the soil irrigated by recycled water, which needs to be noticed.

Key words: recycled water; soil; heavy metal; effect

北京市地处海河流域, 是一座人口密集, 水资源短缺的特大城市, 人均水资源占有量不足 300 m³, 只有全国人均水资源占有量的 1/8; 世界人均水资源占有量的 1/30^[1]. 在世界 120 多个国家和地区的首都及主要城市中北京的人均水资源占有量居百位之后, 远远低于国际公认的人均 1 000 m³ 的下限. 而且人口、资源与环境之间的矛盾十分突出, 水资源短缺已经成为制约北京市社会经济发展的主要因素.

为解决北京的缺水问题, 节流和开源都非常重要. 污水既是废弃物, 同时也是资源, 合理利用污水资源可有效缓解北京缺水问题, 是北京水资源开源的一个重要方向. 在北京, 污水已经成为灌溉用水的重要水源, 特别是干旱季节. 然而, 污水导致的环境问题越来越严重, 其中土壤重金属污染尤为突出^[2-7]. 因此, 利用中水浇灌应该是应对农业缺水的有效途径.

中水是针对给水和排水而给出的一个概念, 是指部分生活优质杂排水经处理净化后, 达到《生活

杂用水水质标准》, 可以在一定范围内重复使用的非饮用水^[8]. 由于中水水质相对污水水质明显提高, 所以采用中水灌溉可减小对土壤的污染, 尤其是重金属污染. 巫常林等^[9]研究发现采用中水灌溉, 短期内重金属在土壤中的累积不明显, 且土壤和作物籽粒中的重金属含量都远低于国家标准规定的允许值, 再生水短期灌溉对土壤环境和作物均不会造成污染影响. 国外相关研究也表明采用中水灌溉时, 灌溉土壤和种植作物中没有出现重金属累积污染现象^[10,11].

然而, 目前还没有针对特殊行业废水处理用于浇灌对土壤污染影响的报道. 本文选取生活污水和实验室废水混合, 经氧化沟处理后出水为水源, 研究特殊行业废水生产的中水用于绿地浇灌对土壤重金属污染的影响.

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目 (yg2012002)

作者简介: 周益奇 (1975~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为有毒污染物的分析方法开发、源解析及迁移转化规律, E-mail: yqzhou@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取北京市海淀区双清路 18 号中国科学院生态环境研究中心园区内中水为水源,以园区内中水浇灌绿地为研究对象,以自来水浇灌花圃为参照进行对比研究.在园区绿地中选取阔叶林区、荆棘区和草地区中共 5 个采样点,在家属区选取了一个花圃为参照采样点,用土壤采样器采集 0~20 cm 深土样.每个土样按照 0~10 cm、10~15 cm 和 15~20 cm 分成 3 份.另于 2013 年 4 月 7~16 日连续采集 9 d 的中水和自来水样品.

该中水由一体式氧化沟处理工艺生产.处理工艺进水包含生活污水和实验室污水,其中生活污水占 80%,实验室污水占 20%,项目验收时工艺出水排放符合城镇污水处理厂污染物排放标准.采样区域中水浇灌采用喷灌方式,浇灌量约 $1.5 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,连续浇灌了 3 a,参照取样点用自来水浇灌,采用喷灌方式,浇灌量约 $2.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,连续浇灌了 3 a.

1.2 仪器与试剂

土壤研磨仪;天平;电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS(美国 Agilent 公司,型号 7500);消煮炉;优级纯硝酸 HNO_3 (北京化学品公司);优级纯盐酸 HCl (北京化学品公司);超纯水($18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$);ICP 分析用标准溶液(中国国家标准物质中心);烧杯;表面皿;比色管;容量瓶.

1.3 ICP-MS 仪器条件:

使用 Agilent 7500 ICP-MS 调谐溶液调制仪器灵敏度,氧化物含量等指标达到测量要求.测试铅、镉、铬、铜、镍、锰、锌、砷这 8 种重金属元素.仪器参数参见文献[12].

1.4 样品预处理

(1)水样:用 $0.45 \mu\text{m}$ 膜过滤,待分析用.

(2)土壤样品:取 0.5 g 过筛样品,用称量纸送入消煮管底部,加 5 mL 王水(盐酸:硝酸 = 3:1)静置过夜.将静置过夜的样品放入消煮炉加热至 100°C ,保持 1 h,将温度升至 120°C ,保持 1 h,再将温度升至 $140 \sim 160^\circ\text{C}$,待王水剩余约 1 mL 左右时取出消煮管,降温至室温后加 $1 \sim 2 \text{ mL}$ 高氯酸,升温到 $140 \sim 160^\circ\text{C}$ 消煮,待土壤变成灰白色取出,冷却后过 $0.45 \mu\text{m}$ 膜并转移至 100 mL 容量瓶中,用硝酸(1%)定容,待测.

1.5 分析步骤

(1)定性分析 用标准样品进样分析,通过特

征碎片确定.

(2)定量分析 采用外标法定量.

1.6 质量控制

1.6.1 标准曲线

取 1.00 mL 浓度为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$,含 24 种元素的混合标准溶液 A 于 100 mL 容量瓶中,用 1% 硝酸溶液定容并充分混匀.用 1% 硝酸溶液将此溶液进一步稀释到 $0.100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 得标准使用溶液 B.移取 $0, 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00 \text{ mL}$ 标准使用溶液 B 于 100 mL 容量瓶中,用 1% 硝酸溶液定容,混匀,得到浓度为 $0, 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准溶液,用于绘制标准曲线.

1.6.2 加标回收

准确称取 0.5 g 经研磨处理过的土壤于消解管中,加入 $1, 5$ 或 $10 \mu\text{g}$ 的目标元素到消解罐中,加 5 mL 王水(盐酸:硝酸 = 3:1)静置过夜,按照样品前处理的条件进行消解,用于加标回收实验,每个加标量样品做 3 个重复测试.加标回收率计算方法见式(1).

$$\text{加标回收率} = (C_{\text{加标样品}} - C_{\text{样品}}) / C_{\text{加标}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $C_{\text{加标样品}}$ 为加入标准后的样品中目标元素的测定值, $C_{\text{样品}}$ 为样品中目标元素的测定值, $C_{\text{加标}}$ 为目标元素的加标值.

1.7 土壤重金属环境质量评价方法

运用土壤质量指数法 $P_i = (C_i - C_{si}) / C_{si}$ 进行评价.式中, P_i 为第 i 种污染物的土壤质量指数, C_i 为第 i 种污染物的实测值, C_{si} 为第 i 种污染物的背景值.本研究依据文献[13]的研究结果为背景值,北京市土壤中砷、镉、铬、铜、镍、铅和锌的背景值分别为 $7.09, 0.119, 29.8, 18.7, 26.8, 24.6$ 和 $57.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

本研究采用文献[14]的方法,污染指数 $P_i < 0.2$ 为正常背景值水平;污染指数 P_i 在 $0.2 \sim 0.6$ 为微污染或轻污染水平;污染指数 P_i 在 $0.6 \sim 1.0$ 为污染水平;污染指数 $P_i > 1.0$ 为重污染水平,产品残留超标.

2 结果与讨论

2.1 方法的准确度、精密性及检测线

选用 Y、In 作为内标元素,有效地校正了基体干扰,获取了理想的灵敏度和精确度.8 种重金属回收率为 $87\% \sim 96\%$ 之间,不同加标量 3 次重复测

试回收率相对标准偏差 $< 5.0\%$, 方法检测限 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

用无水硫酸钠跟踪采样所得过程空白及试剂空白中目标元素含量低于仪器检出限.

2.2 中水和自来水中重金属浓度

为了弄清自来水与中水中常见 8 种重金属元素的浓度差异, 从 2013 年 4 月 7 ~ 16 日进行了连续 9 d 采样分析. 从分析结果看, 自来水中砷、铬、镍、铅、锰和锌的平均浓度分别为 6.05 、 10.54 、 59.56 、 1.13 、 7.03 和 $4134.83 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 铜和镉的浓度低于方法检出限. 中水中砷、铬、镍、铅、锰和锌的平均浓度分别为 14.09 、 181.92 、 87.84 、 10.71 、 298.71 和 $1286.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 只在一个中水样品中检出铜, 浓度为 $7.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 按照 9 个样品算出的铜的平均浓度为 $0.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 中水中镉浓度仍然低于检出限.

从图 1 可以明显看出, 除锌元素, 中水中其它 7 种重金属元素浓度明显高于自来水中浓度, 有些元素浓度差异超过了 10 倍. 然而, 自来水中锌的浓度是中水中浓度的将近 4 倍, 可能是实验废水中锌排放较少, 而且在污泥中有很强的吸附从而导致中水中锌浓度的下降. 赵秀兰等^[15]证实了城市污水处理厂污泥中具有较高含量的锌, 其含量达到 $362.13 \sim 725.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 污水综合排放标准 GB 8978-1996 中规定重金属限定浓度为: 总铬 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总砷 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总铅 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总镍 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而总铜、总锌和总锰的一级排放标准分别是 5.0 、 2.0 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 所以尽管中水中重金属浓度远高于自来水中浓度, 可能会对浇灌土壤产生一定影响, 但中水中镉、铬、砷、铅和镍浓度

表 1 土壤中重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
平均含量	25.81	264.23	13.89	11.38	42.53	9.65	0.10	12.35
最高含量	29.43	297.17	14.78	13.14	57.80	10.48	0.18	15.72
最低含量	23.46	243.76	12.57	8.31	30.26	9.06	0.07	7.02

平均含量分别为 25.81 、 264.23 、 13.89 、 11.38 、 42.53 、 9.65 、 0.10 和 $12.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 含量从高到低的顺序是锰 > 锌 > 铬 > 镍 > 铅 > 铜 > 砷 > 镉. 北京市土壤背景值中 7 种重金属含量顺序为锌 > 铬 > 镍 > 铅 > 铜 > 砷 > 镉. 本研究分析得到的重金属元素含量顺序与北京土壤背景值一致, 没有表现明显污染.

胡文等^[2]研究发现, 北京凉水河污水灌溉区土壤中铜、锌、铬、铅、镍的平均含量分别为 64.9 、

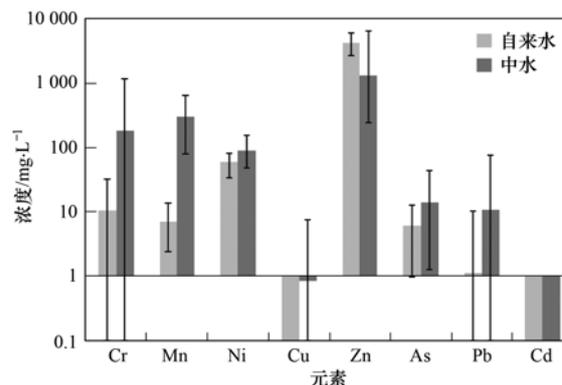


图 1 自来水和中水中 8 种重金属浓度

Fig. 1 Concentrations of 8 heavy metals in tap water and recycled water

远低于污水综合排放标准, 而铜、锌和铅浓度低于一级排放标准, 所以从排水角度, 该中水水质完全符合排放要求. 农田灌溉水质标准 GB 5084-2005 中规定重金属限定浓度为砷 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、镉 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铬 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铜 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铅 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、锌 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 本研究用于浇灌的中水中铬浓度是农业灌溉水质标准的将近 2 倍, 其余重金属含量均低于农业灌溉水质标准, 可能原因是实验室做痕量有机分析时常用铬酸洗液清洗玻璃器皿, 大量铬酸废液进入废水, 经氧化沟处理后没有完全去除所致, 浇灌土壤中铬污染状况值得引起关注.

2.3 土壤样品中重金属污染状况

2.3.1 土壤样品中重金属总体污染状况

分析的 8 种重金属在所有样品中均有检出. 从表 1 可以看到, 铬、锰、镍、铜、锌、砷、镉和铅的

含量分别为 25.81 、 264.23 、 13.89 、 11.38 、 42.53 、 9.65 、 0.10 和 $12.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本研究测定含量远低于胡文等的结果. 原因是北京凉水河长期承接北京的生活及工业废水, 有相当一部分是未经处理直接排放的污水, 污染相对严重, 其长期用于浇灌引起的土壤重金属污染比较严重. 杨军等^[16]的研究也发现, 北京凉水河污水灌溉区土壤重金属污染严重, 尤其是砷、铬、铜、汞、镍、锌, 其中铬、铜、汞和锌的含量明显高于北京市土壤背景值; 中水浇灌区土壤重金属含量与北京市土壤背景值相当; 而井灌区

土壤重金属含量最低。

2.3.2 中水浇灌区与自来水浇灌区对比

从图 2 可以看到,中水浇灌土壤和自来水浇灌土壤中 8 种重金属铬、锰、镍、铜、锌、砷、镉和铅的含量无明显差异。其中自来水浇灌区土壤中锌元素含量明显高于中水浇灌土壤中锌元素含量,这一结果与水中测定结果一致。但笔者也发现自来水浇灌区土壤中铬和铅的浓度也高于中水浇灌区土壤中浓度,可能是因为每年冬天该苗圃都会用化粪池的水进行漫灌施肥造成的影响。Quin 等^[10]研究发现用中水长期浇灌牧场,浇灌土壤没有出现重金属累积。Smith 等^[11]对比了清水和污水二级处理出水浇灌大型绿地的情况,相比清水浇灌,中水浇灌土壤中重金属累积并不显著,中水浇灌土壤中重金属含量与当地土壤背景值无显著差异。巫常林等^[9]研究发现,短期中水浇灌不会对土壤环境和作物造成污染影响。本研究结果与相关报道基本一致。

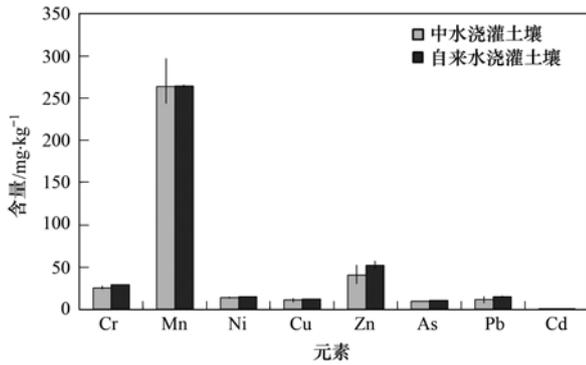


图 2 自来水和中水浇灌土壤中 8 种重金属含量
Fig. 2 Concentrations of 8 heavy metals in soil irrigated with tap water and recycled water

2.3.3 中水浇灌区不同样点的差异

本研究采集了不同植被覆盖类型,研究中水浇灌导致的土壤重金属污染差异。从图 3 来看,除锰、镍和砷元素外,其它元素没有表现出明显差异。锰、镍和砷元素在阔叶林土壤中含量较高,其次是荆棘林土壤和草地土壤,这主要是草地对表层土壤元素利用率高,表层土壤中容易被草利用的元素随着剪草活动而流失。

2.3.4 中水浇灌区不同深度土壤重金属差异

从图 4 可以看出,中水浇灌区土壤中除锰外,其它重金属在表层土壤的含量最高,且随土壤深度增加浓度降低。自来水浇灌区土壤中 8 种重金属都表现出在表层土壤的富集。重金属在中水浇灌区土壤和自来水浇灌区土壤中的富集没有明显差异。杨军

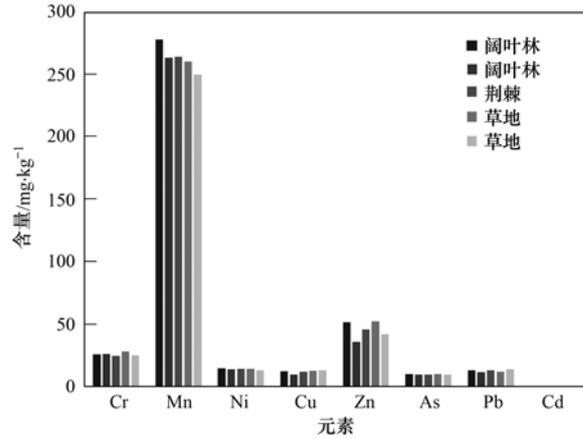


图 3 不同植被类型土壤中 8 种重金属平均含量
Fig. 3 Mean concentrations of 8 heavy metals in soil covered with different plants

等^[17]研究也发现在淋溶 20 d(1 a 的灌溉量)以及 60 d(3 a 的灌溉量),灌溉水中的砷、镉、铜和铅主要在表层(0~10 cm)累积。随着淋溶时间延长重金属表现出向下迁移的趋势。然而,马祥爱^[18]等研究发现污灌降低了重金属残留态所占比例,改变了土壤中重金属存在形态,提高了重金属的生物有效性和迁移能力。因此,尽管中水浇灌并没有导致表层土壤的明显富集,与自来水浇灌土壤也没有明显差异,但是在长期使用中水浇灌时对土壤重金属形态和生物有效性的影响仍然值得关注。

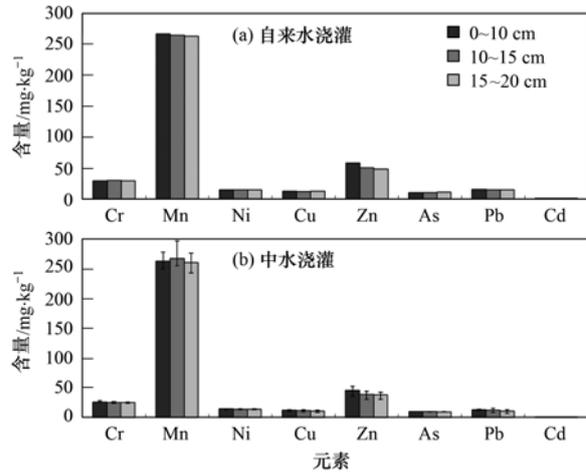


图 4 不同深度土壤中 8 种重金属平均含量
Fig. 4 Mean concentrations of 8 heavy metals in soil at different depth

2.4 土壤重金属环境质量评价

利用土壤评价法,对 5 个中水浇灌点,共计 15 个土壤样品中铬、锰、镍、铜、锌、砷、铅、镉污染进行了评价。中水浇灌土壤中铬、镍、铜、锌、铅这 5 种元素含量均低于北京市土壤背景值,处于正常

背景值水平. 从图 5 可以看出, 中水浇灌土壤中砷元素污染指数介于 0.2~0.6 之间, 均处于轻度污染水平. 中水浇灌土壤镉元素整体有 86% 污染指数 < 0.2, 处于正常背景值水平; 14% 处于轻度污染水平. 因此, 应该将砷和镉作为该中水浇灌土壤的常规监测项目, 关注其浓度变化, 进而关注其形态、迁移性和生物有效性, 为该中水长期用于绿地浇灌的安全性评价提供科学依据.

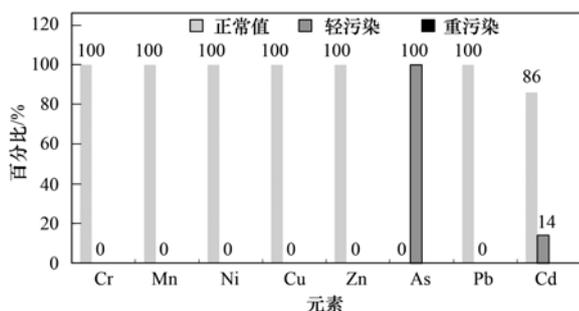


图 5 中水浇灌土壤中 8 种重金属污染评价结果

Fig. 5 Contamination assessment of 8 heavy metals in soil irrigated with recycled water

3 结论

生活污水和实验室废水混合, 经氧化沟处理后的中水中重金属铬、镍、铜、锌、砷、铅、镉浓度均高于自来水中浓度. 该中水浇灌土壤中 8 种重金属浓度与自来水浇灌土壤没有显著性差异. 中水浇灌土壤的重金属主要在表层富集, 其中铬、镍、铜、锌、铅含量低于北京市土壤背景值, 不存在污染; 浇灌土壤中砷和镉存在轻度污染, 值得关注.

参考文献:

- [1] 刘捷, 储娟. 北京市中水回用问题浅析[J]. 生态经济, 2007, (7): 138-141.
- [2] 胡文, 王海燕, 查同刚, 等. 北京市凉水河污灌区土壤重金属累积和形态分析[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1491-1497.
- [3] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 II. 污染土壤的健康风险评估[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 142-151.
- [4] 严兴, 罗刚, 曹健, 等. 污水处理厂再生水灌溉对土壤中重金属污染的试验研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(36): 226-231.
- [5] Shrivastava S K, Banerjee D K. Speciation of metals in sewage sludge and sludge-amended soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 152(1): 219-232.
- [6] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 716-724.
- [7] Zhang Y L, Dai J L, Wang R Q, et al. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characterizations in Shandong, China[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(1): 84-91.
- [8] 中华人民共和国建设部. 城市中水设施管理暂行办法[S]. 1995.
- [9] 巫常林, 黄冠华, 刘洪禄, 等. 再生水短期灌溉对土壤-作物中重金属分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 91-96.
- [10] Quin B F, Syers J K. Surface irrigation of pasture with treated sewage effluent. III: Heavy metal content of sewage effluent, sludge, soil, and pasture[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1978, 21(3): 435-442.
- [11] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia[J]. Environmental Pollution, 1996, 94(3): 317-323.
- [12] 刘平, 周益奇, 臧利杰. 北京农贸市场 4 种鱼类体内重金属污染调查[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2062-2068.
- [13] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122.
- [14] 毕士川, 于慧娟, 蔡友琼, 等. 重金属 Cd 在不同水产品中的含量及污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 181-185.
- [15] 赵秀兰, 卢吉文, 陈萍丽, 等. 重庆市城市污泥中的重金属及其农用环境容量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 188-192.
- [16] 杨军, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 209-217.
- [17] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 449-456.
- [18] 马祥爱, 秦俊梅, 冯两蕊. 长期污水灌溉条件下土壤重金属形态及生物活性的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 318-322.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行