

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

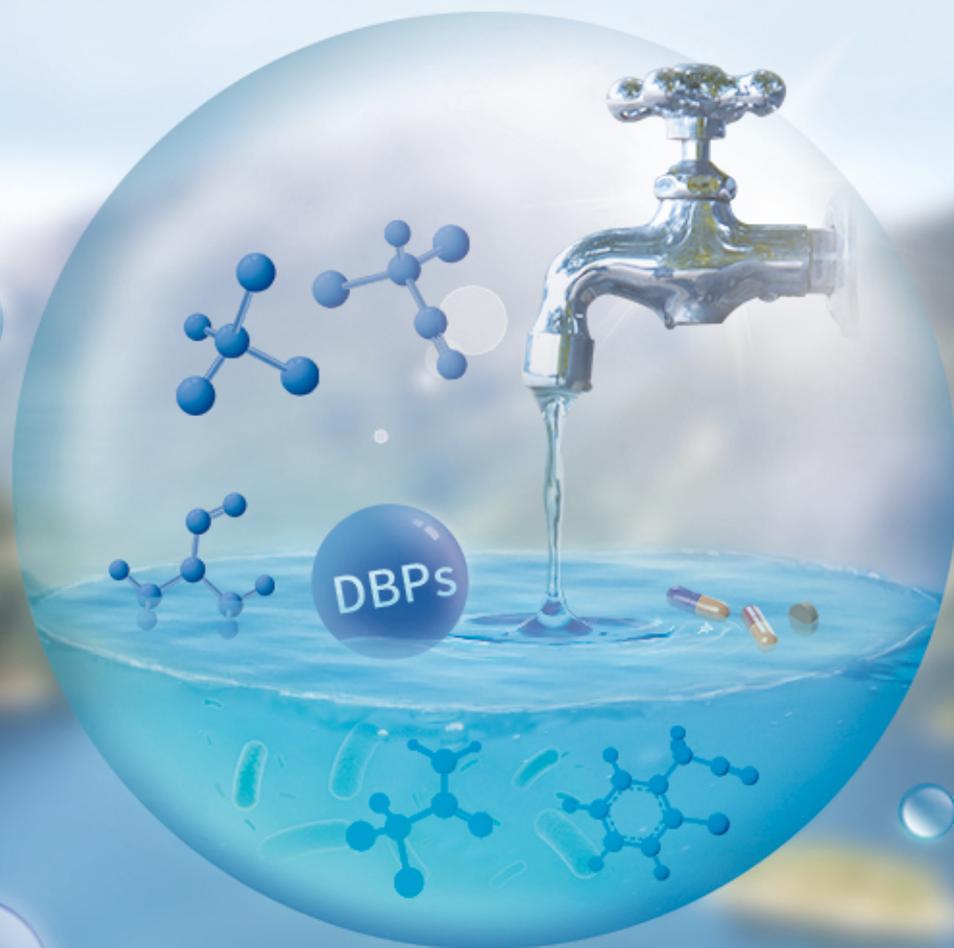
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期

Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫祺, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性柞木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估

孙帅^{1,2}, 耿柠波^{1*}, 郭崔崔^{1,2}, 张保琴¹, 卢宪波¹, 张海军¹, 陈吉平¹

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析了我国东部北方和南方沿海地区市售叶类、根茎类、瓜果类、豆类及食用菌5类蔬菜样品中6种有害金属元素(Cr、Ni、As、Cd、Hg和Pb)及5种人体必需金属元素(Mn、Fe、Cu、Zn和Se)的累积水平,并研究了其在不同蔬菜样品中的分布特征.结果表明,所有蔬菜样品中的6种有害金属水平均远低于国家食品安全标准规定的最高限量,居民食用这些蔬菜不存在明显的非致癌风险,但因食用蔬菜导致的无机砷暴露有 10^{-5} 水平的潜在致癌风险.蔬菜对有害金属和必需金属的累积呈现出明显的同步趋势($P < 0.01$).相比其他蔬菜,食用菌表现出对有害金属及必需金属更高的累积水平,提醒人们需加强对食用菌中重金属污染的监测工作.

关键词: 重金属; 东部沿海; 蔬菜; 累积分布; 膳食暴露

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5519-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202102147

Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China

SUN Shuai^{1,2}, GENG Ning-bo^{1*}, GUO Cui-cui^{1,2}, ZHANG Bao-qin¹, LU Xian-bo¹, ZHANG Hai-jun¹, CHEN Ji-ping¹

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The levels of six toxic metals and five essential metals in five groups of vegetables marketed in the eastern coastal region of China were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry. The results showed that the concentrations of six toxic heavy metals in all the vegetables did not exceed the maximum residue limits. The health risk assessment indicated that consumption of vegetables may not pose a potential noncarcinogenic risk to consumers, while there is a carcinogenic risk level of 10^{-5} level from inorganic arsenic exposure through vegetable consumption. Additionally, a similar trend was observed for the accumulation of toxic and essential metals. Furthermore, compared with other vegetable groups, edible fungi have a high potential to accumulate toxic and essential metals, which indicates that pollution monitoring of edible fungi should be strengthened.

Key words: heavy metals; eastern coastal region; vegetables; accumulation characteristics; dietary exposure

重金属在环境介质中广泛存在,其半衰期长,无法降解,并能通过食物链在生物体内累积.重金属污染已成为当今全球环境污染的重要课题之一^[1].中国环境保护部和国土资源部开展的第一次全国土壤污染状况调查显示,中国正面临严峻的土壤重金属污染问题^[2].此外,我国水体中重金属污染情况也不容乐观^[3].东部沿海地区工业发达,城市化水平高,人口密度大,重金属污染状况更为突出^[4].

重金属一旦进入土壤和水体,便能被植物吸收并通过食物链传递到人体.有研究表明,食用被重金属污染的食物是人体暴露于重金属的主要途径^[4].有的重金属,如Fe、Cu和Zn,是人体生命活动必需的微量元素,对维持机体正常生理功能具有重要作用,缺乏或过量都不利于身体健康.有的重金属,如Cd、Hg和Pb等,即使浓度很低,也会对人体健康造成不利影响.以上有害金属可能造成中枢神经损伤^[5],影响生长发育^[6],甚至诱发癌症^[7].如Pb对神经系统、造血系统、肾脏和骨骼等都具有损伤^[8],Cd具有内分泌干扰效应^[9],无机砷(iAs)由

于可引起肺癌、膀胱癌和皮肤癌等已被国际癌症研究机构(IARC)列为一类致癌物(Group 1)^[10].

蔬菜在中国居民,尤其是在东部地区居民饮食结构中占据很大比重^[11].中国居民膳食指南(2016版)建议一般人群每日蔬菜摄入量应控制在300~500g^[12].蔬菜不仅富含碳水化合物、蛋白质、膳食纤维及维生素,也是人体矿物质的重要来源.尽管蔬菜能为人体提供多种营养物质,但蔬菜本身也能累积环境中的有害物质^[4].对土壤和蔬菜中重金属污染状况的研究指出,蔬菜和土壤中的重金属含量存在显著的正相关性^[13].居民食用被污染的蔬菜可能损害人体健康.因此,评估蔬菜中的重金属污染水平是我国食品安全领域的重要课题.Liang等^[4]对北京地区食品中重金属的研究表明,经蔬菜摄入的重金属对当地居民造成的风险暴露占总膳食暴露的

收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1600200); 大连市科技创新基金应用基础研究项目(2020JJ26SN057)

作者简介: 孙帅(1993~),女,博士研究生,主要研究方向为食品安全风险评估, E-mail: sunshuai@dicp.ac.cn

* 通信作者, E-mail: gengningbo@dicp.ac.cn

38%. 广东省疾病预防控制中心对来自省内 21 个地级市的蔬菜中 Cd、Pb、As、Hg 和 Cr 这 5 种重金属污染水平的研究表明,不同地区和类别的蔬菜中重金属含量差别显著^[14]. Sun 等^[15]研究了广东韶关小型废弃矿区附近蔬菜样品中重金属的污染水平,发现空心菜中的 As 和油麦菜中的 Cd 可达 $2.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.447 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出国家食品安全标准的最大值. Luo 等^[16]对广东省某电子垃圾处理厂附近蔬菜样品中的重金属污染状况的研究表明大多数蔬菜中 Cd 和 Pb 水平超标. 此外,对北京地区蔬菜中重金属的调查显示当地蔬菜中重金属污染状况不容乐观^[4]. 总体来看,关于东部沿海地区蔬菜中重金属污染水平的研究多集中在发达地区或典型的高污染地区,对整个区域蔬菜中重金属污染状况的研究相对不足. 本研究采集了我国东部沿海地区 5 大类主要蔬菜样品,通过对蔬菜样品中重金属含量的分析,探讨了不同类别蔬菜样品中重金属的累积水平及分布特征,估算了居民因食用蔬菜导致的重金属暴露,以期为食品安全风险评估提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

本实验中用到的超纯水由 Millipore 净水系统 (Millipore D 24 UV) 制备,优级纯硝酸($\geq 65\%$)购自 CNW,优级纯过氧化氢(30%)购自国药集团化学试剂有限公司,标准物质(GNW10210)购自坛墨质检. 此外,包含 27 种金属元素的混合标准溶液和汞标准溶液均购自安捷伦科技有限公司. 高通量密闭微波消解/萃取/合成工作站(MASTER40)及配套的微机控温加热板(ECH20)购自上海新仪微波化学科技有限公司,电感耦合等离子体质谱仪(8900 Triple Quadrupole ICP-MS)购自安捷伦科技有限公司.

1.2 样品采集

鉴于研究区域内居民饮食习惯,人口特征及地理因素存在差异,沿海区域被划分为北方沿海和南

方沿海两大地区. 从 2018 年 4 月至 2018 年 9 月,在研究地区主要城市的超市、零售店采集了 105 份蔬菜样品,其中北方沿海地区 47 份,南方沿海地区 58 份. 采集的蔬菜覆盖居民经常食用的叶类蔬菜、根茎类蔬菜、瓜果类蔬菜、豆类蔬菜以及食用菌 5 大类. 采集的蔬菜大多数为当地生产. 采样完成后将采集的蔬菜装入聚乙烯自封袋内,用保温箱低温运输至实验室. 南北沿海地区划分及采样点地理分布如图 1 所示.

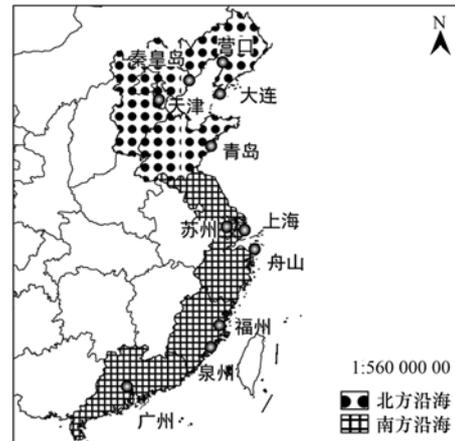


图 1 采样区域划分及采样点分布示意

Fig. 1 Division of sampling regions and distribution of sampling sites

1.3 样品处理与仪器分析

采集的蔬菜样品先用自来水冲洗干净表面土壤等颗粒物,之后用超纯水冲洗并沥干水分,手工去除不可食用的部分. 取每个蔬菜样品等质量的可食用部分按采样地区及蔬菜类别混合制备同类蔬菜的混合样品. 将混合蔬菜样品匀浆后冷冻干燥,共获得 10 个混合蔬菜样品,不同类别的蔬菜样本量如表 1 所示.

取冻干后的蔬菜样品约 0.3 g (精确到 0.001 g),放入聚四氟乙烯样品消解罐中. 先加入 8 mL 浓硝酸,预消解后再加入 2 mL 过氧化氢,加盖密封,置于微波消解仪中进行消解. 微波消解程序如下: 10 min 内升温到 150°C ,之后升温到 180°C 并保持 20 min. 消解结束后,待消解罐冷却至室温,直接将消解罐转移到加热板上,在 100°C 赶酸. 赶酸结束后将消

表 1 不同类别蔬菜品种及样本量

Table 1 Sample species and sizes of different types of vegetables

蔬菜类别	北方沿海品种(样本量)	南方沿海品种(样本量)
叶类蔬菜	菠菜(3)、上海青(3)、卷心菜(2)、生菜(1)、娃娃菜(1)和白菜(1)	上海青(5)、生菜(2)、娃娃菜(2)、卷心菜(2)、红苋菜(2)、油麦菜(2)、芥菜(1)和菜心(1)
根茎类蔬菜	胡萝卜(2)、洋葱(2)、白萝卜(1)、蒜薹(1)、山药(1)、大蒜(1)和大葱(1)	白萝卜(3)、洋葱(3)、胡萝卜(1)、藕(1)、蒜薹(1)、芹菜(1)和毛茛白(1)
瓜果类蔬菜	西红柿(3)、茄子(3)、黄瓜(3)、丝瓜(2)、甜椒(2)、冬瓜(1)和尖椒(1)	茄子(4)、西红柿(3)、黄瓜(3)、西葫芦(2)、菜椒(2)、苦瓜(1)、秋葵(1)和西蓝花(1)
豆类蔬菜	芸豆(3)、扁豆(1)、荷兰豆(1)和豇豆(1)	芸豆(2)、甜豆(1)、油豆角(1)、豇豆(1)和荷兰豆(1)
食用菌	香菇(2)、花菇(1)、杏鲍菇(1)、鸡腿菇(1)和口蘑(1)	香菇(3)、杏鲍菇(2)、金针菇(1)和白玉菇(1)

解液转移至容量瓶,用超纯水洗涤消解罐 3~4 次,洗涤液也一并转移入容量瓶。用超纯水定容至 25 mL,过 0.45 μm 滤膜后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存,待测。蔬菜样品中重金属采用电感耦合等离子体质谱仪测定。

1.4 质量保证与质量控制

分析过程中所有用到的容器均为塑料制品。采用在线内标加入法校正基质干扰。分析过程中,每个样品重复测试 3 次,测定结果的平均 RSD < 5%。每批消解包含一个试剂空白用来检查可能存在的干扰以及一个标准物质样品(GBW10210)用来验证方法的准确度。标准物质中分析元素回收率为 60%~101%。方法检出限(LOD)定义为 6 个空白样品测定结果的 3 倍标准偏差。对于 Cr、Ni、As、Cd、Hg、Pb、Mn、Fe、Cu、Zn 和 Se, LOD 分别为 0.03、0.05、0.009、0.000 4、0.000 2、0.01、0.02、0.76、0.07、0.37 和 0.004 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。当某元素的含量低于 LOD 时,按 1/2LOD 计算。分析元素的标准曲线回归系数均 > 0.999。此外,为了验证仪器稳定性,样品测试结束后,进样中等浓度的标准溶液,两次测试结果仪器响应 RSD < 5%。

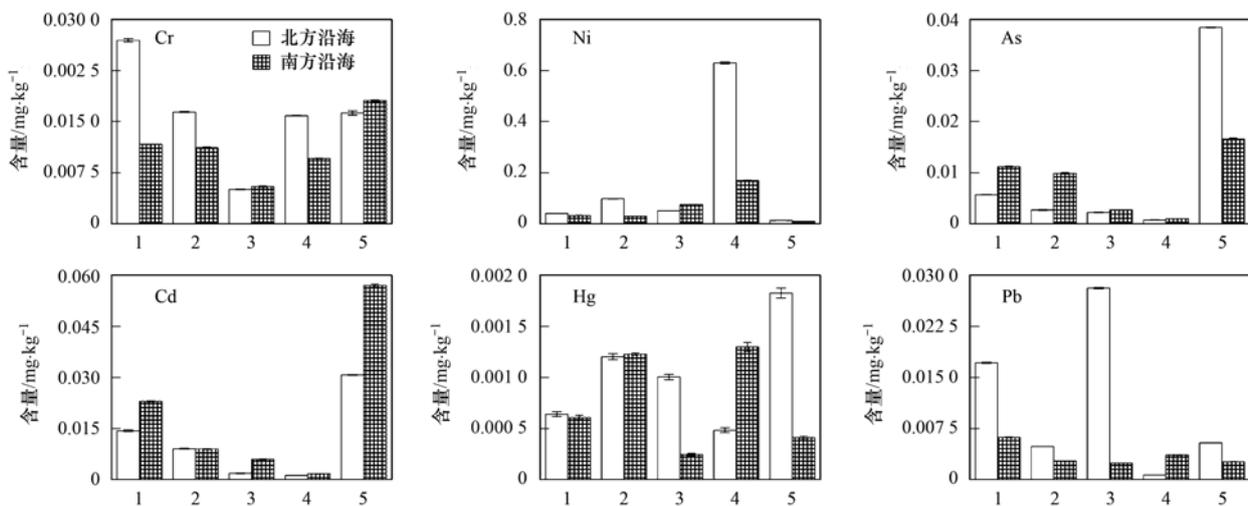
1.5 不同蔬菜重金属累积水平及居民暴露评估

不同蔬菜样品的金属累积水平用金属污染指数(metal pollution index, MPI)来衡量。MPI 越高,相应的金属累积水平越高。MPI 可根据公式(1)计算^[17]。

$$\text{MPI} = (C_1 \times C_2 \times C_3 \times \dots \times C_n)^{1/n} \quad (1)$$

式中, C_n 为蔬菜样品中金属元素 n 的含量。用目标危害系数(target hazard quotient, THQ)评估居民因蔬菜摄入的重金属导致的非致癌风险。THQ 根据公式(2)计算^[17]。

$$\text{THQ} = \text{EDI}/\text{RfD}_0 \quad (2)$$



1. 叶类蔬菜, 2. 根茎类蔬菜, 3. 瓜果类蔬菜, 4. 豆类蔬菜, 5. 食用菌

图2 蔬菜中6种有害金属元素的含量

Fig. 2 Concentrations of six toxic metals in vegetables from north and south coastal regions

式中, RfD_0 为污染物的口服参考剂量, EDI 为因食用蔬菜导致的每日金属摄入量。EDI 可根据公式(3)计算^[17]。

$$\text{EDI} = (R \times C_n)/\text{BW} \quad (3)$$

式中, R 为蔬菜消耗量, 根据国家统计局 2020 年公布的数据, 对于北方沿海地区居民, R 取 285 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 对于南方沿海地区居民, R 取 271 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[11]; BW 是成年人的平均体重, 本研究中, BW 取 60 kg ^[18]。另外, 由于居民处于多种金属的联合暴露下, 用 HI (hazard index, HI) 进一步评估居民因食用蔬菜导致多种金属联合暴露产生的非致癌风险。HI 可由公式(4)计算^[17]。

$$\text{HI} = \text{THQ}_1 + \text{THQ}_2 + \text{THQ}_3 + \dots + \text{THQ}_n \quad (4)$$

式中, THQ_n 为蔬菜样品中金属元素 n 的 THQ。特别地, 对于 iAs, 采用目标致癌风险(target cancer risk, TR)评估居民因食用蔬菜导致 iAs 暴露产生的致癌风险。TR 可根据公式(5)计算^[17]。

$$\text{TR} = \text{EDI} \times \text{CFS} \quad (5)$$

式中, CFS (1.5 $\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$) 为美国环保署(EPA)推荐的 iAs 致癌斜率因子^[21]。

2 结果与分析

2.1 蔬菜样品中有害金属元素累积水平

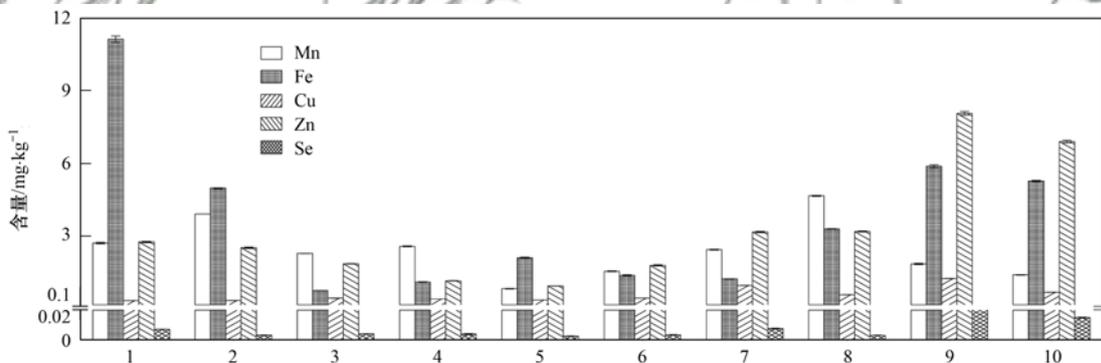
我国沿海地区市售蔬菜样品中 6 种有害金属含量均处于相对较低水平, 均远低于食品安全国家标准(GB 2762-2017)所规定的最大限量^[19]。如图 2 所示, 来自北方沿海地区的叶类蔬菜中 Cr, 豆类蔬菜中 Ni, 食用菌中 As 和 Hg、瓜果类蔬菜中的 Pb 以及来自南方沿海地区食用菌中的 Cd 在所有样品中含量最高。6 种金属元素在蔬菜样品中的平均水平按

从高到底的顺序依次为: Ni($0.115 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cd($0.015 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr($0.014 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > As($0.009 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb($0.007 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Hg($0.0009 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 受采样地点、采样时间及样品类别的影响,不同地区不同研究获得的蔬菜样品中重金属含量可能存在较大差异. 与近年来已有研究报道的蔬菜中重金属水平相比,本研究所测的 Ni、As、Cd 和 Hg 水平与江苏(Cd: $0.006 \sim 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[20]、浙江(Ni: $0.094 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; As: $0.009 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cd: $0.017 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13,21,22] 和广东(Ni: $0.0031 \sim 0.163 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; As: $0.0133 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cd: $0.0174 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Hg: $0.00122 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14,23,24] 地区市售蔬菜污染水平大致相当,但本研究所测的 Cr 和 Pb 水平低于浙江(Cr: $0.057 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Pb: $0.022 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[21,22] 和广东地区市售蔬菜中重金属的水平(Cr: $0.0387 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Pb: $0.0291 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13,21,22]. 与 Liang 等^[4] 对北京地区蔬菜的研究相比,本研究测得的 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 有害金属元素水平明显偏低. 另外,本研究所测的重金属水平也明显低于广东地区电子垃圾处理厂和矿区附近蔬菜样品重金属污染水平^[15,16].

2.2 蔬菜样品中必需金属元素累积水平

除了累积有害金属元素,蔬菜也是人们摄入必

需微量金属元素的重要来源. 蔬菜样品中 5 种必需金属元素的水平如图 3 所示. Fe 和 Zn 是蔬菜中最丰富的两种微量金属元素,在检测的蔬菜样品中,Fe 和 Zn 的平均水平分别为 $3.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Mn 是除 Fe 和 Zn 外较丰富的微量金属元素,其平均水平为 $2.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cu 在不同蔬菜样品中也有一定累积,其平均水平为 $0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Se 在不同蔬菜中含量最低,其平均水平为 $0.009 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在所有样品中,含 Fe 量最高的是来自北方沿海地区的叶类蔬菜,Zn、Cu 和 Se 含量最高的是北方沿海地区的食用菌;而来自南方沿海地区的豆类蔬菜 Mn 含量最高. 本研究所测的蔬菜样品中 Fe 水平低于北京地区(Fe: $11.31 \sim 19.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[4],Zn 和 Cu 水平与广东地区市售蔬菜(Zn: $1.757 \sim 4.756 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu: $0.203 \sim 0.921 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14,23,24] 的水平一致,略低于南京地区温室种植的蔬菜(Zn: $2.583 \sim 7.002 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu: $0.739 \sim 1.309 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25],远远低于广东电子垃圾处理厂附近蔬菜样品污染水平(Zn: $3.69 \sim 21.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu: $0.59 \sim 3.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[16]. 与济南地区研究相比,本研究中 Mn 含量与济南地区市售蔬菜(Mn: $2.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 在同一水平,但 Se 含量低于济南地区蔬菜(Se: $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26].



1. 北方沿海叶类蔬菜, 2. 南方沿海叶类蔬菜, 3. 北方沿海根茎类蔬菜, 4. 南方沿海根茎类蔬菜, 5. 北方沿海瓜果类蔬菜, 6. 南方沿海瓜果类蔬菜, 7. 北方沿海豆类蔬菜, 8. 南方沿海豆类蔬菜, 9. 北方沿海食用菌, 10. 南方沿海食用菌

图 3 蔬菜中 5 种必需金属元素的含量

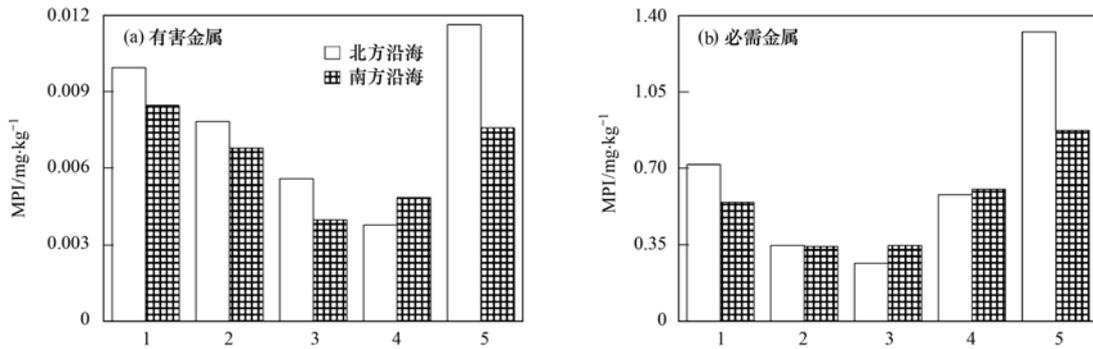
Fig. 3 Concentrations of five essential metals in vegetables from north and south coastal regions

2.3 蔬菜样品中重金属累积分布特征

不同蔬菜样品的 MPI 如图 4 所示. 从中可知,北方沿海地区的食用菌同时具有最高的有害金属及必需金属累积水平. 总体来看,食用菌类、叶类对金属的累积水平高于其他类别蔬菜. 瓜果类和豆类蔬菜的金属累积水平相对较低. 进一步对蔬菜中有害金属和必需金属做了相关性分析. 如图 5 所示,两类金属的皮尔森相关系数 $r = 0.66407$ ($P < 0.01$),表明有害金属和必需金属在蔬菜中的累积呈现出同步趋势,即在累积有害金属的同时,也会增加必需金属

元素累积水平.

不同类别蔬菜样品中有害及必需金属对各自总累积水平的贡献如图 6 所示. 食用菌中 6 种有害金属元素的累积特征明显不同于其他类别蔬菜. 在除食用菌类的蔬菜样品中,6 种有害金属中相对含量最高的是 Ni,其在叶类、根茎类、瓜果类和豆类蔬菜中占比(质量分数,下同)为 $38\% \sim 97\%$ (平均值: 65%),其次是 Cr,占比为 $2\% \sim 26\%$ (平均值: 11%). 在叶类、根茎类、瓜果类和豆类蔬菜中含量最低的 Hg 和 As 平均占比分别为 0.8% 和 5% . 然



1. 叶类蔬菜, 2. 根茎类蔬菜, 3. 瓜果类蔬菜, 4. 豆类蔬菜, 5. 食用菌

图 4 不同类别蔬菜样品中有害金属元素和必需金属元素的累积指数

Fig. 4 MPIs of toxic and essential metals in vegetables from north and south coastal regions

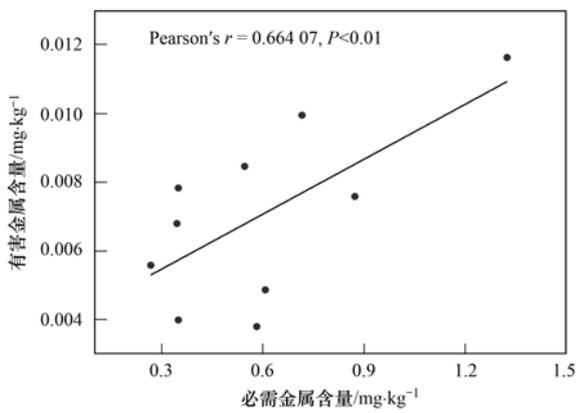


图 5 蔬菜样品中有害金属元素和必需金属元素的累积相关性

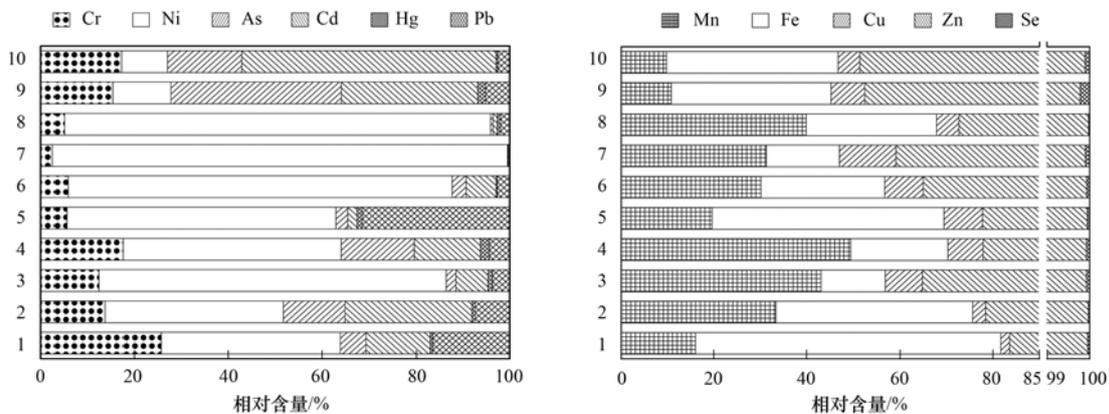
Fig. 5 Accumulation correlation of toxic and essential metals in vegetables

而,在食用菌样品中,6种有害金属中相对含量最高的是Cd,其平均占比为42%,其次为As,平均占比为26%.含量最低的是Hg和Pb,其平均占比为1%和4%.Fe、Zn和Mn在所有蔬菜样品中相对含量都较高,但在不同类别蔬菜中的相对含量也有差异.Fe在叶类蔬菜中占据主导地位,其平均相对含量为54%,其次是Mn(25%)和Zn(19%);Mn在根茎类

蔬菜中相对含量最高,其平均相对含量为46%,其次是Zn(28%)和Fe(17%);瓜果类蔬菜中Fe的平均相对含量最高,为38%,Zn和Mn的平均相对含量差别不大,分别为28%和25%;豆类蔬菜中Mn和Zn的平均相对含量较高,分别为36%和34%,Fe的平均相对含量22%;食用菌中,Zn的相对含量最高,其平均值为48%,其次为Fe,平均相对含量为36%,Mn在食用菌中含量较低,仅占10%,Se在所有蔬菜中相对含量均为最低,平均为0.08%.

2.4 暴露评估

采用THQ、HI及TR评估了居民因食用蔬菜摄入重金属导致的非致癌风险及致癌风险.对于Hg和As元素,甲基汞(MeHg)和iAs生物毒性远高于这两种元素的其他存在形态^[7, 10].而本研究测得的是Hg和As的元素总量.采用MeHg占蔬菜中总Hg含量的5%^[27],iAs占蔬菜中总As含量的95%^[15, 28]来计算其毒性参数.由表2可知,6种有害金属及5种必需金属元素的EDI均低于EPA提出的参考剂量^[7].THQ可用来评估居民因食用蔬菜导致的潜在非致癌风险,如果 $THQ \geq 1$,说明食用蔬菜



1. 北方沿海叶类蔬菜, 2. 南方沿海叶类蔬菜, 3. 北方沿海根茎类蔬菜, 4. 南方沿海根茎类蔬菜, 5. 北方沿海瓜果类蔬菜, 6. 南方沿海瓜果类蔬菜, 7. 北方沿海豆类蔬菜, 8. 南方沿海豆类蔬菜, 9. 北方沿海食用菌, 10. 南方沿海食用菌

图 6 不同类别蔬菜样品中有害金属元素和必需金属元素的相对含量(质量分数)

Fig. 6 Contribution proportions of toxic and essential metals in vegetables from north and south coastal regions

导致的金属暴露对人体有潜在非致癌风险,如果 THQ <1,则认为没有明显的非致癌风险. 从表 4 可看出,所有金属的 THQ 均 <1,说明食用这些蔬菜对居民没有明显的非致癌风险. HI 可以用来评价蔬菜样品中金属联合暴露的总危害系数,根据公式(4)可得北方沿海和南方沿海地区蔬菜样品的 HI 分别为 0.35 和 0.31,二者均 <1,说明蔬菜中多种金属联合暴露的危

害系数较低. 蔬菜中 iAs 的存在可能具有一定的致癌风险. TR >10⁻⁴认为是存在不可接受的致癌风险,TR 在 10⁻⁶和 10⁻⁴之间时,认为具有潜在的致癌风险^[29]. 北方和南方沿海蔬菜样品中 iAs 的 TR 分别为 7×10⁻⁵和 5×10⁻⁵,处于 10⁻⁶和 10⁻⁴的可接受区间,说明南北方沿海地区居民食用蔬菜样品导致的 iAs 暴露存在 10⁻⁵水平的潜在致癌风险.

表 2 蔬菜中重金属日摄入量估算(EDI)、目标危害系数(THQ)及目标致癌风险(TR)¹⁾

Table 2 Estimated daily intake(EDI), target hazard quotient(THQ), and target cancer risk(TR) of heavy metals in vegetables

项目	RfD ₀ /μg·(kg·d) ⁻¹	EDI(以体重计)/μg·(kg·d) ⁻¹		THQ		TR	
		北方沿海	南方沿海	北方沿海	南方沿海	北方沿海	南方沿海
Cr	1 500	0.08	0.05	5×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁵	—	—
Ni	20	0.79	0.29	0.04	0.01	—	—
iAs	0.3	0.05	0.04	0.15	0.12	7×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
Cd	1	0.05	0.09	0.05	0.09	—	—
MeHg	0.1	0.000 2	0.000 2	0.002	0.002	—	—
Pb	4	0.05	0.02	0.01	0.004	—	—
Mn	140	9.56	12.68	0.07	0.09	—	—
Fe	700	19.99	14.43	0.03	0.02	—	—
Cu	40	3.11	2.15	0.08	0.05	—	—
Zn	300	15.90	14.00	0.05	0.05	—	—
Se	5	0.06	0.03	0.01	0.01	—	—

1) “—”表示 EPA 未提供该元素的致癌斜率因子,因此未计算 TR 值

3 讨论

以上结果表明,不同类别蔬菜中重金属和必需金属元素的分布模式存在差异. 蔬菜累积金属元素主要通过地下部分根的吸收和地上部分对空气中灰尘、颗粒物的吸附. 与其他类别蔬菜相比,叶类蔬菜和食用菌具有更高的金属累积水平,尤其是食用菌,其为居民提供必需金属元素的同时,也导致居民暴露于有害金属元素. 此前也有很多研究表明菌类对重金属具有更高的富集能力^[30, 31]. 食用菌的高金属累积水平可能与其生长环境及其自身对环境中金属的高吸收转运能力有关. 在本文所研究的 5 大类蔬菜中,叶类蔬菜的金属累积水平仅次于食用菌,说明叶类蔬菜对环境中的金属具有较强的累积能力. 相较于其他类别蔬菜,叶类蔬菜具有更大的比表面积,这有利于叶类蔬菜吸附空气中的灰尘和颗粒物,从而导致高金属累积^[32]. 相较于其他类别蔬菜,根茎类蔬菜具有更大的地下部分,这有利于根茎类蔬菜吸收土壤中的金属离子,也导致了根茎类蔬菜的金属累积水平虽然低于食用菌和叶类蔬菜,但高于瓜果类和豆类蔬菜. 瓜果类和豆类蔬菜的金属累积水平最低,这主要是由于这两类蔬菜主要依靠地下部分吸收金属离子后转运到植物的可食用部位以及可食用部位自身对空气中灰尘颗粒物的吸附.

4 结论

我国东部沿海地区叶类、根茎类、瓜果类、豆

类和食用菌这 5 类蔬菜中有害金属的含量均远低于食品安全国家标准,居民食用这些蔬菜不存在明显的非致癌风险,但居民因食用蔬菜导致的无机砷暴露有 10⁻⁵水平的潜在致癌风险. 不同类别蔬菜中金属的累积分布特征存在明显差异,这与蔬菜本身特点及生长环境相关. 食用菌具有最高的有害金属和必需金属元素的累积水平,提示人们需加强食用菌中金属污染水平监测.

参考文献:

- [1] Pei F, Wang Y Y, Fang Y, *et al.* Concentrations of heavy metals in muscle and edible offal of pork in Nanjing city of China and related health risks[J]. *Journal of Food Science*, 2020, **85**(2): 493-499.
- [2] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [3] Fan J Y, Jian X, Shang F, *et al.* Underestimated heavy metal pollution of the Minjiang River, SE China; evidence from spatial and seasonal monitoring of suspended-load sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142586.
- [4] Liang G, Gong W W, Li B R, *et al.* Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the health risks to the general public via consumption in Beijing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(6), doi: 10.3390/ijerph16060909.
- [5] Gao Y, Shi Z M, Long Z, *et al.* Determination and speciation of mercury in environmental and biological samples by analytical atomic spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2012, **103**: 1-14.
- [6] Liu G N, Yu Y J, Hou J, *et al.* An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-

- acid battery factory[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **47**: 210-218.
- [7] United States Environmental Protection Agency. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories [EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20003P11.PDF?Dockey=20003P11.PDF>, 2021-04-11.
- [8] Wani A L, Ara A, Usmani J A. Lead toxicity: a review[J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2015, **8**(2):55-64.
- [9] Kabir E R, Rahman M S, Rahman I. A review on endocrine disruptors and their possible impacts on human health [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, **40**(1): 241-258.
- [10] International Agency for Research on Cancer. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. A review of human carcinogens: arsenic, metals, fibres, and dusts [M]. Lyon: IARC Press, 2012.
- [11] 国家统计局. 中国统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook-2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [12] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 2016[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
- [13] Ye X Z, Xiao W D, Zhang Y Z, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in vegetables and relationships with soil heavy metal distribution in Zhejiang province, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(6), doi: 10.1007/s10661-015-4604-5.
- [14] Liang H, Wu W L, Zhang Y H, *et al.* Levels, temporal trend and health risk assessment of five heavy metals in fresh vegetables marketed in Guangdong Province of China during 2014-2017[J]. *Food Control*, 2018, **92**: 107-120.
- [15] Sun Z H, Hu Y N, Cheng H F. Public health risk of toxic metal (loid) pollution to the population living near an abandoned small-scale polymetallic mine[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137434.
- [16] Luo C L, Liu C P, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(1): 481-490.
- [17] Fu L, Lu X B, Niu K, *et al.* Bioaccumulation and human health implications of essential and toxic metals in freshwater products of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 768-776.
- [18] Sun S, Cao R, Lu X B, *et al.* Levels and patterns of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and polychlorinated biphenyls in foodstuffs of animal origin from Chinese markets and implications of dietary exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116344.
- [19] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [20] Zhang Y F, Liu P, Wang C N, *et al.* Human health risk assessment of cadmium via dietary intake by children in Jiangsu Province, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(1): 29-41.
- [21] Huang Z, Pan X D, Wu P G, *et al.* Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China[J]. *Food Control*, 2014, **36**(1): 248-252.
- [22] Pan X D, Wu P G, Jiang X G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep20317.
- [23] Wang Y, Tian C, Wang Z, *et al.* Health risk and temporal trend of dietary potentially toxic elements exposure in the residents of the Shenzhen metropolis, China, between 2005 and 2017: a risk assessment based on probabilistic estimation[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(1): 113-126.
- [24] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398.
- Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [25] Hu W Y, Chen Y, Huang B, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical greenhouse vegetable production system in China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, **20**(5): 1264-1280.
- [26] 李宁, 赵慧娟. 济南市区蔬菜、水果、粮食和鲜肉中铜、锰、锌、硒含量调查[J]. *环境与健康杂志*, 2011, **28**(7): 613-615.
- Li N, Zhao H J. Investigation of copper, manganese, zinc and selenium contents in vegetables, fruits, grains and fresh meat in Jinan, Shandong[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, **28**(7): 613-615.
- [27] Mališová K, Koplík R, Mestek O. Speciation of mercury in terrestrial plants using vapor generation and liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Analytical Letters*, 2015, **48**(15): 2446-2462.
- [28] Jia X T, Yang X Y, Zhao W, *et al.* A method for rapid determination of arsenic species in vegetables using microwave-assisted extraction followed by detection with HPLC hyphenated to inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Journal of Separation Science*, 2019, **42**(18): 2957-2967.
- [29] Shaheen N, Irfan N M, Khan I N, *et al.* Presence of heavy metals in fruits and vegetables: health risk implications in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 2016, **152**: 431-438.
- [30] Fu Z Q, Liu G, Wang L X. Assessment of potential human health risk of trace element in wild edible mushroom species collected from Yunnan Province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(23): 29218-29227.
- [31] Mleczek M, Siwulski M, Budka A, *et al.* Toxicological risks and nutritional value of wild edible mushroom species-a half-century monitoring study[J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128095.
- [32] Sun S, Cao R, Jin J, *et al.* Accumulation characteristics and estimated dietary intakes of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls in plant-origin foodstuffs from Chinese markets[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **775**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145830.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)