

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期  
Vol.43 No.1

# 目次

|                                                      |                                                             |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 .....                           | 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 ( 1 )                                 |
| 植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 .....                             | 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 ( 11 )                                |
| 基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 .....                            | 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 ( 26 )                                     |
| 不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 .....                    | 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 ( 37 )                                   |
| 北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 .....                 | 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 ( 46 ) |
| 武汉冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 .....    | 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 ( 61 )                            |
| 运城市 PM <sub>2.5</sub> 时空分布特征和潜在源区季节分析 .....          | 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 ( 74 )                 |
| 中国东部冷锋推进中的 PM <sub>2.5</sub> 三维结构变化特征 .....          | 牟南南, 朱彬, 卢文 ( 85 )                                          |
| 粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 .....                       | 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 ( 93 )                      |
| 西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 .....            | 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 ( 102 )           |
| 拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 .....                       | 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 ( 113 )                          |
| 杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 .....                 | 林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 ( 123 )                      |
| 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 .....                        | 金丹 ( 132 )                                                  |
| 铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O <sub>3</sub> 和 SOA 形成潜势分析 ..... | 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 ( 140 )                    |
| 电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 .....                        | 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 ( 150 )                      |
| 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 .....                      | 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 ( 160 )                    |
| 淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 .....                             | 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 ( 170 )                           |
| 昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 .....                            | 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 ( 180 )                     |
| 城市路面积尘微塑料污染特征 .....                                  | 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 ( 189 )                                   |
| 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 .....                         | 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 ( 199 )                                   |
| 赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 .....                            | 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 ( 210 )       |
| 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 .....                         | 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 ( 220 )                                    |
| 白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 .....                    | 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 ( 230 )                        |
| 九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 .....                  | 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 ( 239 )                         |
| 北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 .....              | 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 ( 247 )                              |
| 城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 .....                          | 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 ( 256 )                              |
| 苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 .....                   | 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 ( 267 )                                   |
| 苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 .....                           | 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 ( 277 )                              |
| 信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 .....                       | 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 ( 285 )                               |
| 三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 .....                  | 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 ( 295 )                |
| 李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 .....                      | 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 ( 306 )         |
| 岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 .....                          | 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 ( 314 )                         |
| 宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 .....                         | 王晓东, 田伟, 张雪艳 ( 329 )                                        |
| 快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 .....              | 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 ( 339 )                               |
| 长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 .....      | 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 ( 349 )                    |
| 洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 .....                | 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 ( 363 )                             |
| 基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 .....                        | 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 ( 369 )           |
| 三峡库区万州段河流水-气界面 CO <sub>2</sub> 通量支干流对比及影响机制初探 .....  | 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 ( 377 )                                   |
| 功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb <sup>2+</sup> 的吸附行为 .....  | 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 ( 387 )                             |
| 铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 .....                  | 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 ( 398 )                                |
| 沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 .....                              | 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 ( 409 )                                   |
| 温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 .....                  | 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 ( 416 )                                     |
| 填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 .....                     | 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 ( 424 )                    |
| 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 .....                | 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 ( 432 )                        |
| 浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险 .....                        | 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 ( 442 )                           |
| 农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区 .....                           | 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 ( 454 )                             |
| 基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 .....                     | 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 ( 463 )                               |
| 调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 .....                        | 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 ( 472 )                         |
| 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 .....                     | 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 ( 481 )                    |
| 电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 .....                 | 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 ( 490 )                    |
| 雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 .....              | 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 ( 500 )                         |
| 重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 .....                            | 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 ( 510 )                          |
| 长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 .....                   | 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 ( 521 )                   |
| 土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 .....                  | 姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 ( 530 )                    |
| 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 .....                   | 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 ( 540 )                 |
| 秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 .....                        | 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 ( 550 )                       |
| 全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 .....                | 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 ( 560 )          |
| 秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 .....            | 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 ( 569 )                         |

# 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估

董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊\*

(河北农业大学资源与环境科学学院省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北省农田生态环境重点实验室, 河北省蔬菜产业协同创新中心, 保定 071000)

**摘要:**近年来京津冀地区春季扬沙、秋冬季节雾或霾频发,大气可吸入颗粒物尤其是 $PM_{2.5}$ 可负载镉铅砷等重金属,易被叶菜类蔬菜(叶菜)吸收并在可食部位累积,设施叶菜类蔬菜可食部位重金属的累积是否同样受大气沉降的影响.对此,以京津冀地区常见6种叶菜类蔬菜——菠菜、油麦菜、生菜、小白菜、茼蒿和茴香为主要对象,采用田间试验,探索了大棚叶菜可食部位镉(Cd)、铅(Pb)和砷(As)的累积特征、可食部位污染物的来源并评价了叶菜中镉铅砷累积的人体健康风险.结果表明,茼蒿、小白菜和菠菜分别为Cd、Pb和As的低转运和低积累型,茴香属于Cd和Pb均低转运和低积累型.此外,大气颗粒物监测结果显示 $PM_{2.5}$ 负载的Pb含量分别为Cd和As含量的42.6倍和8.4倍,且大气沉降对6种叶菜可食部位Pb累积平均贡献率为36.5%,这说明设施叶菜中累积的Cd、Pb和As主要来源于土壤.此外,在土壤重金属不超标的情况下,大棚种植的6种设施叶菜中Cd、Pb和As含量均未超过食品安全国家标准(GB 2762-2017),且叶菜中Pb累积并未产生健康风险,但是除摄入茴香无明显健康风险外,其他叶菜类蔬菜可食部位Cd的累积对成人和儿童均产生显著的健康风险,同时值得关注的是茼蒿可食部位As的累积对成人和儿童均产生显著的健康风险.

**关键词:**叶菜类蔬菜; 重金属; 大气沉降; 土壤; 污染来源; 健康风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0481-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202106002

## Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse

DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, ZHOU Chang, ZHANG Xiang-yu, XUE Pei-ying, LIU Wen-ju\*

(Collaborative Innovation Center of Vegetable Industry in Hebei, State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Key Laboratory of Ecological Environment of Farmland in Hebei, College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In recent years, dust pollution has occurred frequently in spring and haze or fog in autumn and winter. The inhalable particulate matters in the atmosphere, especially  $PM_{2.5}$ , loaded in heavy metals such as cadmium, lead, and arsenic, are easily taken up by leafy vegetables and accumulate in the edible parts. It is not clear whether the accumulation of heavy metals in the edible parts of leafy vegetables in greenhouses is also affected by atmospheric deposition. Therefore, a field experiment was conducted to explore characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse using six types of common leafy vegetables (spinach, leaf lettuce, lettuce, pakchoi, *Chrysanthemum coronarium*, and fennel) in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The results showed that *C. coronarium*, pakchoi, and spinach are the leafy vegetables with a low accumulation of Cd, Pb, and As, respectively. Fennel is the leafy vegetable with a low accumulation of Cd and Pb. In the greenhouse, Pb concentrations in  $PM_{2.5}$  were 42.6 and 8.4 times of Cd and As, respectively. Moreover,  $PM_{2.5}$ -Pb contributed on average 36.5% to the edible parts of six kinds of leafy vegetables, which indicated that the Cd, Pb, and As accumulated in leafy vegetables were mainly derived from the soil. Meanwhile, the concentrations of Cd, Pb, and As in the edible parts of vegetables did not exceed the safety limitations of three heavy metals (GB 2762-2017), and Pb accumulation in leafy vegetables does not pose a health risk to humans. However, Cd in the leafy vegetables could threaten the health of adults and children, except for the intake of fennel. Conversely, As in the *C. coronarium* could threaten the health of adults and children.

**Key words:** leafy vegetables; heavy metals; atmospheric deposition; soil; sources of pollution; health risk

随着工业化、城市化和农业的快速发展,环境重金属污染导致的农产品安全问题日益受到关注<sup>[1,2]</sup>.“铅超标蔬菜和小麦籽粒”及“镉米”等重金属污染事件频发<sup>[3,4]</sup>,农作物可从土壤、水和大气中吸收并富集重金属,其中大气颗粒物沉降是农产品(尤其是叶菜类蔬菜)重金属的主要来源之一<sup>[5,6]</sup>.镉(Cd)、铅(Pb)和砷(As)是环境中的三大主要重金属污染物,易通过食物链威胁人体和生态健康,且已被美国环保署(USEPA)列为优先控制污染物<sup>[7]</sup>.2019年河北省设施蔬菜播种面积为 $224.67 \times 10^3$

$hm^2$ ,占全国蔬菜总面积的25.8%.设施蔬菜产量 $1.40 \times 10^7$  t,占河北蔬菜总产量的25.5%<sup>[8]</sup>.随着设施蔬菜的迅猛发展,蔬菜农药残留和重金属污染带来的农产品安全问题日益突出,因此科学评估设施蔬菜重金属累积状况及其健康风险是现代设施农业发展不可或缺的重要环节之一.

收稿日期: 2021-06-01; 修订日期: 2021-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870490)

作者简介: 董俊文(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为农业环境保护, E-mail: 1158866723@qq.com

\* 通信作者, E-mail: liuwj@hebau.edu.cn

近年来,我国多地出现了由于环境污染而导致的蔬菜重金属污染问题.在东北地区设施蔬菜出现系列重金属超标问题,如沈阳某设施菜田中菠菜 Cd 含量超标<sup>[9]</sup>;吉林省某矿区蔬菜中 Cd 含量超标率为 23.5%,Pb 含量超标率为 20.6%<sup>[10]</sup>,而四平设施蔬菜 Cd 超标率高达 61.0%<sup>[11]</sup>.在华北地区也存在设施蔬菜重金属超标现象,如山西中南部设施蔬菜出现了不同程度的 Cd 和 Pb 超标问题<sup>[12]</sup>,河北保定工业区水芹和白菜的可食部位 Pb 明显累积并超过国家标准<sup>[4]</sup>,人体正常摄入这些超标蔬菜势必会对健康构成威胁.叶菜类蔬菜在人们日常饮食中占有很大比重,而可食部位较大的叶面积为大气中负载重金属的颗粒物进入植物体内提供了更大的可能性,鲜食叶菜的健康风险更大<sup>[13]</sup>.据统计,75%~90% 重金属被可吸入颗粒物吸附,且粒径越小含量越高且迁移距离越远<sup>[14,15]</sup>.有研究证明大气颗粒物负载的重金属可通过干湿沉降被叶菜类蔬菜富集<sup>[16,17]</sup>,沉降在植物上的大气颗粒物,通过地上部茎和叶的表皮和气孔进入体内,本课题组前期研究发现,大白菜叶片气孔的开度是决定其可食部位重金属铅富集的重要因素,其中同位素溯源结果显示白菜叶片中 90% 以上的铅来源于 PM<sub>2.5</sub>-Pb<sup>[6]</sup>.大气沉降对叶类蔬菜而言,无疑是增大了其可食部位遭受重金属污染的风险,并通过食物链影响人体健康<sup>[18]</sup>.那么对于设施种植的叶菜类蔬菜,棚内大气颗粒物的含量及其负载重金属的情况是否也会在一定程度上影响叶菜可食部位重金属的累积,以及人体摄入后产生健康风险,这些都有待深入探究.

总之,目前对京津冀地区典型设施叶菜可食部位重金属的含量特征及其潜在累积机制尚不十分清楚,并且重金属来源分析与农产品安全的关系研究尚需深入,其中大气沉降对设施蔬菜可食部位重金属富集的影响程度尤其值得关注.基于此,本研究以京津冀地区常见且典型的叶菜类蔬菜:菠菜、油麦菜、生菜、小白菜、茼蒿和茴香为主要对象,通过温室大棚的田间小区试验,探索了春季 6 种叶菜中 Cd、Pb 和 As 的累积特征,分析了大气沉降和土壤对叶菜中重金属 Cd、Pb 和 As 积累差异的贡献,以期为保证蔬菜食品安全提供重要理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试蔬菜

菠菜(*Spinacia oleracea* L.):大叶菠菜,购于北京中农金诺科技发展有限公司;油麦菜(*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*):高产四季香油麦,购于沧州市三联种业中心;生菜(*Lactuca sativa* L.):玻璃生菜,购

于蔬菜良种繁育中心;小白菜(*Brassica rapacampestris* L.):绿冠小白菜,购于青县青丰种业有限公司;茼蒿(*Chrysanthemum coronarium* L.):佳美茼蒿,购于青县青丰种业有限公司;茴香(*Foeniculum vulgare*):四季割刀茴香,购于天津市蓟宏农业科技有限公司.

以上 6 种蔬菜为当地时令蔬菜品种,在人们的日常饮食中不可或缺.本研究中,定义茴香和茼蒿为小叶型叶菜,小白菜、菠菜、油麦菜和生菜为大叶型叶菜.

### 1.2 试验设计

于 2020 年 4 月中旬至 5 月下旬在河北农业大学教学试验场大棚内(N38°48'15.52"; E115°24'33.99")进行田间试验(其中 4 月 13 日播种,5 月 18 日收获).土壤质地为砂壤土,土壤 pH 为 7.03,ω(有机质)为 29.10 g·kg<sup>-1</sup>,ω(有效磷)为 55.30 mg·kg<sup>-1</sup>,ω(速效钾)为 160 mg·kg<sup>-1</sup>,ω(Cd)为 0.28 mg·kg<sup>-1</sup>,ω(Pb)为 28.70 mg·kg<sup>-1</sup>,ω(As)为 27.05 mg·kg<sup>-1</sup>.在大棚内分别种植 6 种叶菜,每种叶菜种植面积为 1.5 m×3.0 m,在收获期进行随机破坏性取样,同时棚内放置智能中流量空气总悬浮采样器(武汉天虹 TH-150C)收集 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>2.5-10</sub>和 PM<sub>10-100</sub>颗粒物.

### 1.3 样品采集与测定

植物样品的采集:在收获期,每种叶菜随机采集 3 组叶片和根系,作为重复,每个重复采集 3~6 株叶菜(不同叶菜的长势存在差异),去除腐败的烂叶后,将蔬菜叶片和根系样品分别装入干净的自封袋内运回实验室称鲜重.样品依次用自来水和超纯水清洗两遍后,吸水纸拭干表面水分装入纸袋中,85℃杀青 30 min,65℃烘干至恒重后称干重并计算含水率,然后用研钵研磨至粉末状,保存备用.

土壤样品的采集:采用“S 形”的“五点采样法”随机采集 0~20 cm 耕层土壤,风干,过筛.

植物样品的消煮和测定:准确称取蔬菜叶片干重样品(精确至 0.500 g±0.005 g)分别置于 50 mL 离心管中,加入 5 mL 68% 的 HNO<sub>3</sub>,拧紧瓶盖后回拧半圈,浸泡过夜;次日,将离心管置于石墨消解仪(海能仪器 SH230 中国)上,120℃加热消解,1 h 后,将离心管取出,冷却至室温后,加入 2 mL 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,再放回石墨消解仪上继续消煮,直至消解完全;1 h 后,打开盖子,赶酸至 1 mL,超纯水定容至 50 mL,即为消解原液,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 珀金埃尔默 NexION 350X 美国)测定叶片中 Cd、Pb 和 As 含量,以国家一级标准物质(GBW10047,胡萝卜)进行准确度和精密度控制,并

同步分析空白样品以去除试剂干扰. 所有重金属的回收率为 80%~95%, 均符合质量控制要求. 土壤消煮方法与此相同<sup>[6]</sup>.

大气颗粒物样品的采集: 利用智能中流量空气总悬浮采样器(武汉天虹 TH150C 中国)和 Whatman 石英滤膜( $\Phi$  90 mm), 在 2020 年 4 月 20 日至 5 月 18 日期间于大棚内同步采集大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>2.5-10</sub> 和 PM<sub>10-100</sub> 样品(蔬菜种子于 4 月 13 日播种, 一周后出苗, 在出苗后开始采集大气颗粒物), 每 7 日 1 次, 每次连续采样 72 h, 共采集 4 周. 采样前后的石英滤膜在恒温恒湿(温度 25℃±1℃, 湿度 50%±2%)条件下 48 h 平衡后, 用万分之一天平(奥豪斯 AR225CN 中国)称重, 以差减法计算得到 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>2.5-10</sub> 和 PM<sub>10-100</sub> 的质量浓度. 使用陶瓷剪刀将 1/4 样品膜剪碎后置于 50 mL 离心管中, 其消解和测定方法与上述蔬菜样品相同. 以国家一级标准(GBW07444, 街道尘)进行准确度和精密度控制, 所有重金属的回收率为 100%~110%, 均符合质量控制要求.

铅同位素分析: 使用 ICP-MS 测定消解液(蔬菜、大气颗粒物和土壤)中的 Pb 同位素丰度比. 在测定过程中, SRM NIST981 标准物质用来校正质量效应和仪器参数. 每个样品测定 10 次重复, 取平均值, 其中 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 和 <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 比值的 RSD 通常 <0.5%. 通过测定铅同位素的丰度比, 用于确定蔬菜体内 Pb 污染来源.

根据样品中 <sup>206</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb 和 <sup>208</sup>Pb 的测量丰度, 可以识别大气 PM<sub>2.5</sub>-Pb 和土壤的铅贡献. 以下是铅贡献率的计算公式:

$$\left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}}\right)_c = f_1\left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}}\right)_1 + f_2\left(\frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{207}\text{Pb}}\right)_2 \quad (1)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (2)$$

式中,  $c$  为 6 种蔬菜, 1 和 2 代表两个主要污染来源(大气和土壤),  $f_1$  和  $f_2$  分别为大气和土壤的相对贡献.

#### 1.4 人体摄入含重金属 Cd、Pb 和 As 蔬菜的健康风险评价

针对摄入农产品中重金属引起的健康风险, 采用目前国际上常用的化学致癌物风险评价模型和化学非致癌物风险评价模型来进行评价. Cd 和 As 为化学致癌物, 因此选择化学致癌物风险评价模型, 其表达式为:

$$R_i = \text{ADD}_i \times \text{SF}_i \quad (3)$$

式中,  $R_i$  为化学致癌物质  $i$  所致个人非致癌年风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $\text{ADD}_i$  为化学致癌物质  $i$  的日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{SF}_i$  为化学致癌物质  $i$  的致癌强度系

数,  $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ , Cd 为 6.1, As 为 1.5<sup>[19]</sup>.

分级标准:  $R_i < 1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ , 表示化学致癌物质  $i$  对人体健康产生的风险不明显;  $1 \times 10^{-6} < R_i < 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , 有风险且人体可接受的风险水平;  $R_i > 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , 有较显著风险.

Pb 不属于化学致癌物, 因此选择化学非致癌物风险评价模型, 其表达式为:

$$H = \text{ADD}_i / \text{RfD} \quad (4)$$

式中,  $H$  为化学非致癌物质所致个人非致癌年风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $\text{ADD}_i$  为化学非致癌物质  $i$  的日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $\text{RfD}$  为化学非致癌物质暴露的参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , Pb 为 0.0035<sup>[20]</sup>.

分级标准:  $H \leq 1$ , 表明化学非致癌物尚未对人体造成健康风险;  $H > 1$ , 有很大可能性对人体健康产生影响;  $H > 10$ , 已经对人体健康造成威胁, 存在慢性毒性.

叶菜类蔬菜摄入途径下日均暴露量  $\text{ADD}_i$  计算公式为:

$$\text{ADD}_i = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{IR} \times C_i}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

式中各人体健康风险评价模型参数见表 1<sup>[7,21,22]</sup>.

| 表 1 人体健康风险评价模型参数                                         |          |                                  |                                        |                       |
|----------------------------------------------------------|----------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| Table 1 Parameters of human health risk assessment model |          |                                  |                                        |                       |
| 评价参数                                                     | 含义       | 单位                               | 参考值                                    |                       |
|                                                          |          |                                  | 成人                                     | 儿童                    |
| $C_i$                                                    | 叶菜重金属含量  | $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |                                        |                       |
| IR                                                       | 日均食物摄入量  | $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$  | 0.244 <sup>[21]</sup>                  | 0.150 <sup>[21]</sup> |
| EF                                                       | 叶菜暴露频率   | $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$   | 350 <sup>[22]</sup>                    | 350 <sup>[22]</sup>   |
| ED                                                       | 叶菜暴露年限   | a                                | 30 <sup>[7]</sup>                      | 10 <sup>[7]</sup>     |
| BW                                                       | 体重       | kg                               | 70 <sup>[7]</sup>                      | 16 <sup>[7]</sup>     |
| AT                                                       | 叶菜平均作用时间 | d                                | $\text{ED} \times 350$ <sup>[22]</sup> |                       |

#### 1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据分析, Origin 2019 进行图形处理, SPSS 24.0 统计软件进行统计学分析. 采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行显著性检验, 采用最小显著差异法(LSD)进行不同蔬菜类型重金属含量和转运系数的差异显著性比较.

### 2 结果与讨论

#### 2.1 大棚内大气颗粒物沉降特征和重金属 Cd、Pb、As 含量分析

在 6 种叶菜的自然生长阶段, 大棚条件下不同粒径颗粒物的浓度及重金属含量变化如图 1 所示. 大棚内, 不同粒径颗粒物浓度表现为:  $\text{PM}_{2.5} > \text{PM}_{2.5-10} > \text{PM}_{10-100}$ , 其中平均  $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5-10})$

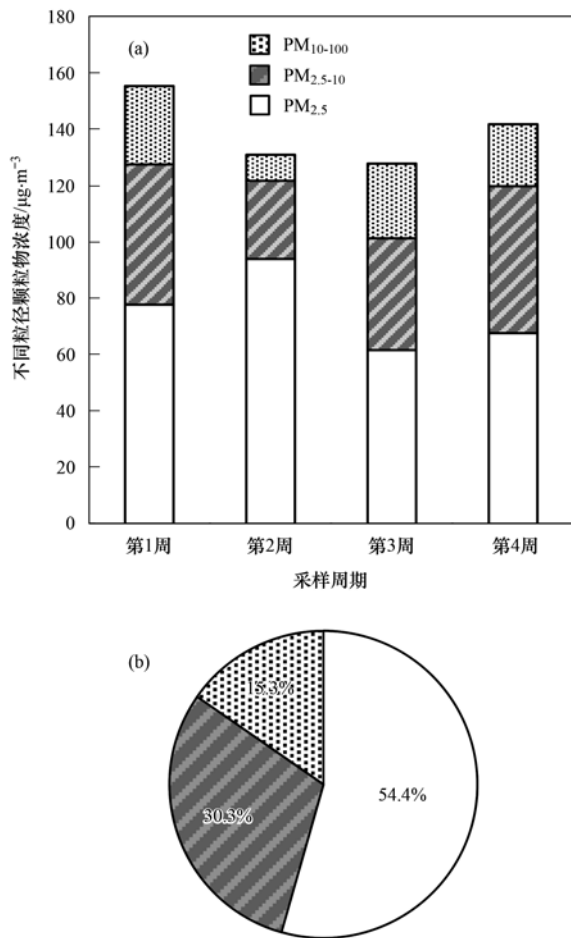


图1 大棚条件下不同粒径颗粒物的浓度和不同粒径在 TSP 所占比例

Fig. 1 Mass concentrations and proportions of atmospheric  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{2.5-10}$ , and  $PM_{10-100}$  in greenhouse

和  $\rho(PM_{10-100})$  分别为 75.13、42.34 和 21.37  $\mu g \cdot m^{-3}$ , 且  $PM_{2.5}$  在总悬浮颗粒物 (TSP) 中的质量分数最大, 为 54.4%,  $PM_{2.5-10}$  和  $PM_{10-100}$  的质量分数分别为 30.3% 和 15.3%, 说明粒径越小, 其颗粒物浓度越大. 这与露天条件下类似 (图 2),  $PM_{2.5}$  的浓度高于其他两种粒径<sup>[6,23]</sup>.

不同粒径颗粒物中  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  特征如图 3 所示.  $PM_{2.5}$  中平均  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  分别为 0.43、16.69 和 2.03  $ng \cdot m^{-3}$ ;  $PM_{2.5-10}$  中平均  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  分别为 0.08、4.50 和 0.47  $ng \cdot m^{-3}$ ;  $PM_{10-100}$  中平均  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  分别为 0.01、1.11 和 0.13  $ng \cdot m^{-3}$ . 从中可以看出,  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  均在  $PM_{2.5}$  中达到最高, 且  $\rho(Pb)$  均高于其他两种重金属含量, 这与露天条件下采集的大气颗粒物的变化特征一致 (图 4), 即粒径越小, 比表面积越大, 其负载的重金属越多<sup>[7]</sup>. 在不同粒径颗粒物中,  $\rho(Pb)$  分别是  $\rho(Cd)$  和  $\rho(As)$  的 28.1 ~ 54.7 和 6.2 ~ 9.4 倍 ( $PM_{2.5}$ )、29.0 ~ 95.3 和 8.1 ~ 14.0 倍 ( $PM_{2.5-10}$ )、46.5 ~

203.9 和 5.9 ~ 14.6 倍 ( $PM_{10-100}$ ), 可见大气颗粒物中负载的 Cd 和 As 远低于 Pb, 因此颗粒物铅对叶菜可食部位铅含量的影响是本研究需要进一步关注的问题. 除此之外, 在前 3 周内  $PM_{2.5}$  中的重金属含量呈现逐渐降低的趋势, 在第 3 周时,  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  均达到最低, 分别为 0.26、12.95 和 1.38  $ng \cdot m^{-3}$ , 而在粒径较大的  $PM_{2.5-10}$  和  $PM_{10-100}$  中, 4 周内的重金属含量变化幅度较小, 并且大棚内外颗粒物中负载重金属含量的趋势相似. 这主要有两方面的原因, 一是  $PM_{2.5}$  粒径较小, 受外部环境的影响较大, 所以在叶菜生育期内其负载的 Cd、Pb 和 As 含量变化幅度较大; 另一个可能的原因是因为负载铅的  $PM_{2.5}$  粒径小, 易通过叶片的气孔被吸收, 叶菜生长至第三周叶面积基本已达到最大值, 对颗粒物中重金属的吸收能力也最强, 而第四周叶片趋于成熟, 此时叶片的气孔密度减少, 对  $PM_{2.5}$  重金属的吸收也随之减少.

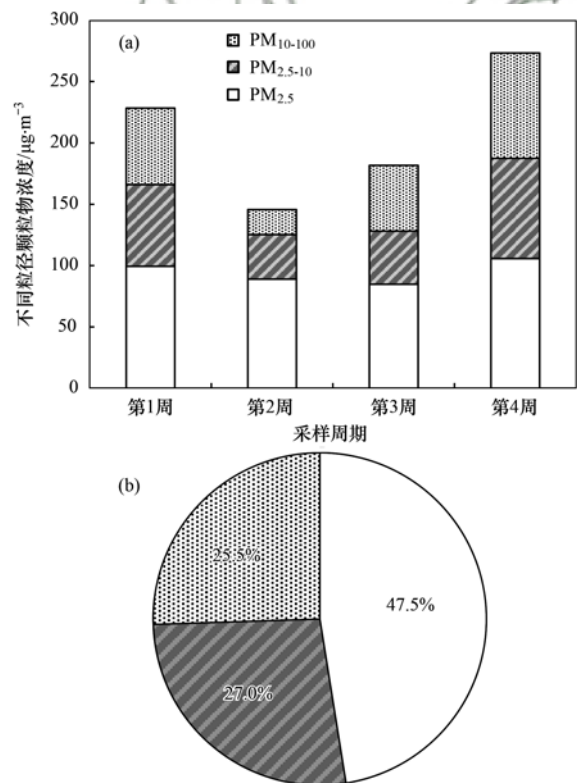


图2 露天条件下不同粒径颗粒物的浓度和不同粒径在 TSP 所占比例

Fig. 2 Mass concentrations and proportions of atmospheric  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{2.5-10}$ , and  $PM_{10-100}$  in open field

## 2.2 叶菜可食部位重金属 Cd、Pb 和 As 含量特征分析

大棚内 6 种叶菜叶片重金属  $\rho(Cd)$ 、 $\rho(Pb)$  和  $\rho(As)$  分别为 0.05 ~ 0.34、0.04 ~ 0.18 和 0.05 ~ 0.29  $mg \cdot kg^{-1}$ , 平均值分别为 0.19、0.09 和 0.17  $mg \cdot kg^{-1}$  (图 5), 其中换算成鲜重, 平均值分别为

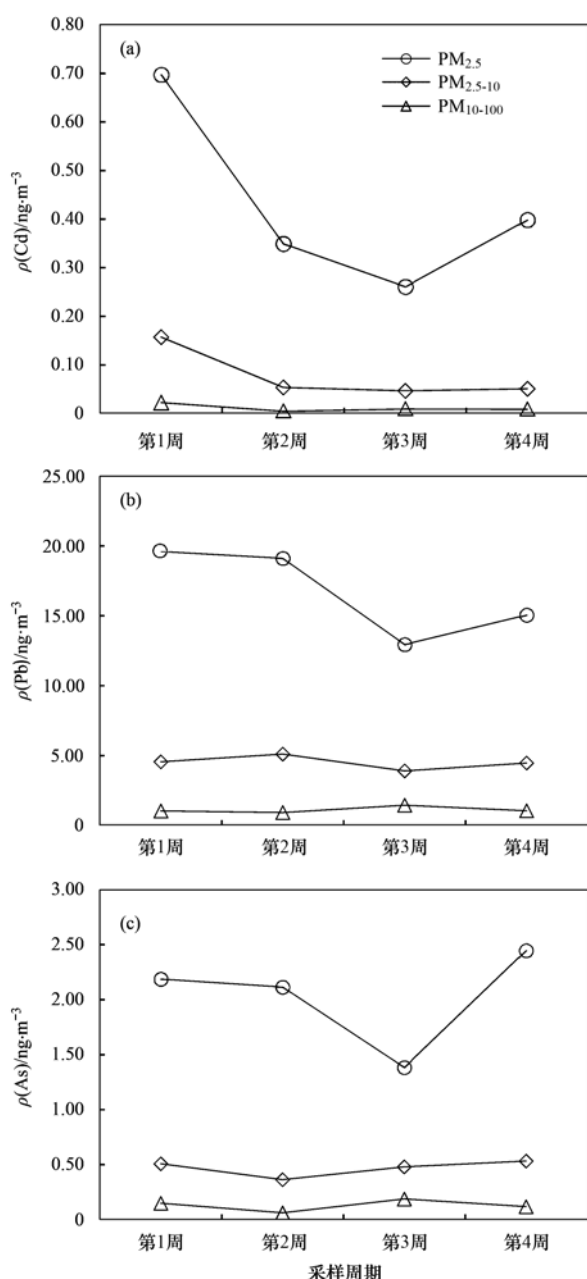


图3 大棚条件下不同粒径颗粒物中重金属 Cd、Pb 和 As 含量变化特征

Fig. 3 Characteristics of concentrations of Cd, Pb, and As in PMs from greenhouse

0.017、0.008 和 0.016 mg·kg<sup>-1</sup>, 均低于食品安全标准<sup>[24]</sup>. 叶片中平均  $\rho(\text{Cd})$  和  $\rho(\text{As})$  高于  $\rho(\text{Pb})$ , 而大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中负载的  $\rho(\text{Cd})$  和  $\rho(\text{As})$  远低于  $\rho(\text{Pb})$ , 这说明叶菜可食部位中的 Cd 和 As 主要来源于土壤. 已有的研究也表明大气沉降对蔬菜 Cd 吸收的贡献较小<sup>[2]</sup>.

收获期菠菜叶片中的  $\rho(\text{Cd})$  最高, 为 0.34 mg·kg<sup>-1</sup>, 显著高于其他 5 种叶菜蔬菜, 增幅为 0.46 ~ 5.35 倍, 其中茴香、茼蒿、小白菜、油麦和生菜中  $\rho(\text{Cd})$  分别是 0.05、0.06、0.23、0.23 和 0.20 mg·kg<sup>-1</sup>, 这是因为菠菜属于藜科植物, 对土壤 Cd

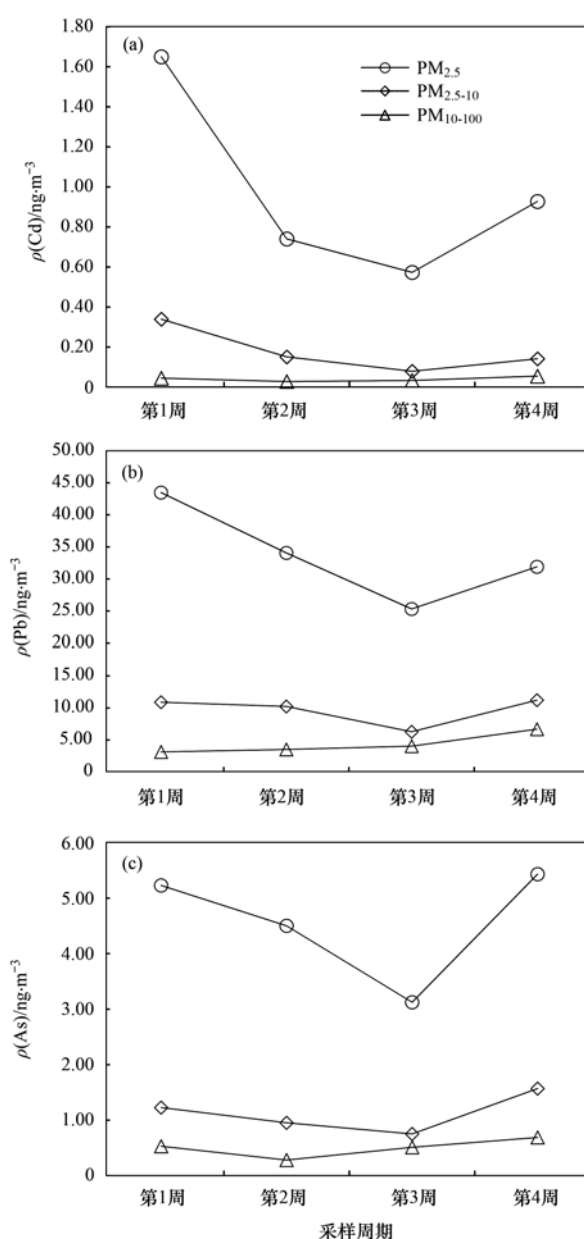


图4 露天条件下不同粒径颗粒物中重金属 Cd、Pb 和 As 含量变化特征

Fig. 4 Characteristics of concentrations of Cd, Pb, and As in PMs in open field

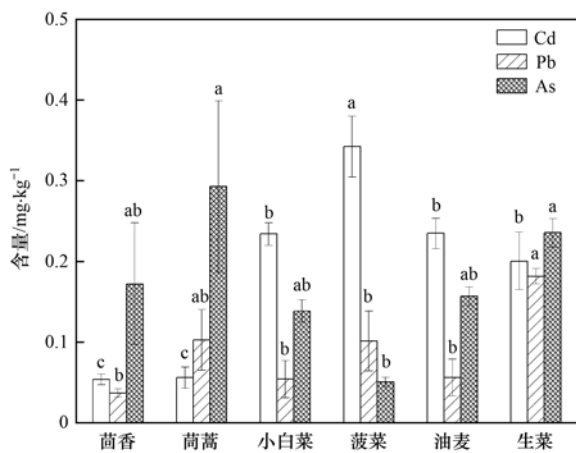
具有高富集特性和较强的转运能力<sup>[25]</sup>.

收获期生菜叶片中的  $\rho(\text{Pb})$  最高, 为 0.18 mg·kg<sup>-1</sup>, 是其他 5 种叶菜的 1.77 ~ 4.93 倍(除茼蒿外均差异显著), 其中茴香、茼蒿、小白菜、菠菜和油麦菜中  $\rho(\text{Pb})$  分别是 0.04、0.10、0.05、0.10 和 0.06 mg·kg<sup>-1</sup>, 这可能是由于生菜的叶面积较大, 接触大气颗粒物的几率较高, 导致了生菜叶片中  $\rho(\text{Pb})$  的升高. 并且土壤中  $\rho(\text{Pb})$  远低于其安全限值, 由此也间接表明了大气沉降对叶类蔬菜中 Pb 的累积贡献较大<sup>[26]</sup>.

茼蒿叶片中的  $\rho(\text{As})$  在收获期最高, 为 0.29 mg·kg<sup>-1</sup>, 是其他 5 种叶菜类型的 1.24 ~ 5.77 倍, 其

中茴香、小白菜、菠菜、油麦和生菜中  $\rho(\text{As})$  分别是 0.17、0.14、0.05、0.16 和 0.24  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 茼蒿与菠菜可食部位 As 含量差异达到显著水平。

综上所述, 6 种叶菜可食部位 Cd、Pb 和 As 主要来源于土壤和大气沉降, 而不同粒径大气颗粒物中重金属  $\rho(\text{Cd})$ 、 $\rho(\text{Pb})$  和  $\rho(\text{As})$  分析发现, Cd、Pb 和 As 均在  $\text{PM}_{2.5}$  中达到最高, 且  $\text{PM}_{2.5}$  负载的  $\rho(\text{Pb})$  远高于  $\rho(\text{Cd})$  和  $\rho(\text{As})$ , 但是可食部位  $\rho(\text{Cd})$  和  $\rho(\text{As})$  高于  $\rho(\text{Pb})$ , 说明叶片中的 Cd 和 As 主要来源于土壤。关于土壤和大气沉降对叶菜可食部位 Pb 累积的贡献程度尚需进一步探讨。



小写字母表示 6 种叶菜同种重金属叶片含量差异性

图 5 6 种蔬菜收获期可食部位  $\rho(\text{Cd})$ 、 $\rho(\text{Pb})$  和  $\rho(\text{As})$  水平

Fig. 5 The  $\rho(\text{Cd})$ ,  $\rho(\text{Pb})$ , and  $\rho(\text{As})$  in the edible parts of six leafy vegetables at the harvest stage

### 2.3 大气沉降和土壤对叶菜可食部位中 Pb 的来源解析及贡献程度

大气-蔬菜-土壤系统中 Pb 同位素特征如图 6 所示, 土壤和大气颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 、 $\text{PM}_{10-100}$ ) 中  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值分别为: 2.465 6 和 2.448 7、2.443 2、2.448 1;  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  比值分别为 1.185 9 和 1.171 1、1.167 4、1.172 3, 其中大气颗粒物的 Pb 同位素比值均低于土壤, 由此表明大棚内大气和土壤中的 Pb 来源不同<sup>[27]</sup>. 按照定义的不同叶型蔬菜分类, 6 种叶菜中的  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  为 2.461 3 和 1.188 1, 与土壤中的 Pb 同位素比值相近, 表明大棚内叶菜中的 Pb 可能主要来源于土壤[图 6 (a)]. 为了进一步解析蔬菜可食部位 Pb 的来源, 又分析了大气颗粒物和土壤对叶菜中 Pb 累积的贡献。

以 2.1 节中 3 种粒径大气颗粒物浓度的相对权重计算总悬浮颗粒物中 Pb 同位素比值后作为大气源, 并进一步计算大气和土壤对叶菜 Pb 污染的相对贡献率. 结果表明, 对于小叶型蔬菜 (茼蒿和茼蒿) 中的 Pb, 土壤源贡献率为 66.4%, 大气源贡献率为 33.6%, 而对于大叶型蔬菜 (小白菜、菠菜、油麦和

生菜), 土壤源贡献率为 60.5%, 大气源贡献率为 39.5% [图 6(b)]. 由此可见, 春季大棚内种植的叶菜 Pb 累积主要来源于土壤, 但大叶型蔬菜中大气源贡献相对高于小叶型蔬菜, 这进一步表明蔬菜叶面积越大, 其体内重金属累积受大气沉降的影响程度越高。

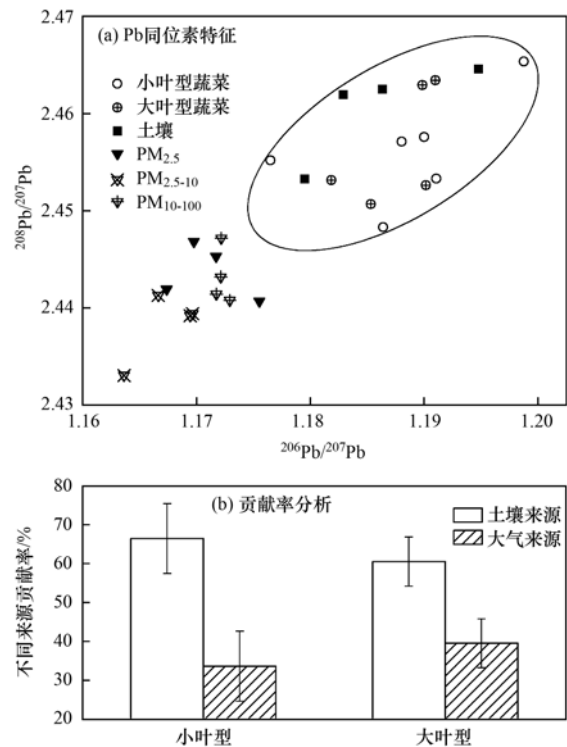


图 6 大气沉降-蔬菜-土壤中 Pb 同位素特征及其贡献率分析

Fig. 6 Contributions of atmospheric deposition and soil to Pb accumulation in six leafy vegetables according to Pb isotopic tracer analysis

### 2.4 叶菜可食部位对重金属 Cd、Pb 和 As 的富集转运特征分析

富集系数是蔬菜可食部分的重金属含量与土壤中重金属含量的比值, 可用来探讨蔬菜对土壤中重金属的吸收和累积效应<sup>[28]</sup>. 富集系数越大说明蔬菜越容易从土壤中吸收该元素, 即该重金属的生物有效性越强<sup>[29]</sup>. 叶菜可食部分重金属的富集系数如表 2 所示, 叶片对 Cd 的富集系数平均为 Pb 的 215 倍和 As 的 103 倍, 说明叶菜类蔬菜对环境 Cd 的富集能力显著高于 Pb 和 As, 其他植物如小麦和大白菜中 Cd、Pb 和 As 的富集也存在相似的趋势 (本课题组未发表数据). 在收获期, 菠菜中 Cd 的富集系数要显著高于其他 5 种叶菜, 这与珠江三角洲地区、中国台湾和南宁市这 3 个地区菠菜 Cd 富集系数的特征一致, 表明在不同地区种植的菠菜 Cd 富集系数均较高<sup>[30~32]</sup>. 同时, 茼蒿和茴香均为 Cd 低累积叶菜, 可推荐在轻度污染的土壤中种植; 生菜和茼蒿分别对 Pb 和 As 的富集系数最高,

表明 Pb 易在生菜可食部位累积,As 易在茼蒿可食部位富集.

转运系数是地上各部位重金属含量与根系重金属含量比值,可用来评价蔬菜重金属由根部向可食部位转移能力的大小<sup>[33]</sup>. 叶菜中重金属 Cd、Pb 和 As 由根系向可食部分的转运系数如表 3 所示. 叶片对 Cd 的转运系数平均为 Pb 的 7 倍和 As 的 4 倍,说明叶菜中 Cd 由根系向可食部位的转运能力要高于 Pb 和 As. 在收获期,大叶型叶菜如小白菜、菠菜、油麦和生菜中由根-可食部位 Cd 转运系数都大于 1,且小白菜中 Cd 的转运系数高达 1.8 以上,说明这 4 种蔬菜 Cd 由根向地上部的转运能力很强. 但是,小叶型蔬菜茴香和茼蒿 Cd 转运系数小于 1,尤其是小叶茴香的 Cd 转运系数最低,这说明 Cd 主要分布在这两种叶菜的根部<sup>[34]</sup>,不易向上迁移;对于 Pb 而言,茼蒿和生菜的转运系数要显著高于其他叶菜,

说明这 2 种叶菜根对 Pb 向地上部的转移能力强于其他 4 种叶菜,同时这 6 种叶菜的转运系数均小于 1,这说明 Pb 主要分布在叶菜的根部,而生菜可食部位含量较高的可能原因:一个是生菜 Pb 的转移能力强,另一个是大气沉降对大叶型叶菜贡献率较高. 对于 As 而言,这 6 种叶菜的转运系数均小于 1,说明 As 主要分布在根部,同时,菠菜的转运系数最低,且菠菜叶片中的 As 含量是最低的,说明菠菜根吸收 As 后,不易向地上部转移.

通过 6 种叶菜富集、转运特征,可以分析出,对于 Cd 而言,小白菜、菠菜、油麦、生菜是高转运和高积累型,这也与相关研究的结果一致<sup>[25]</sup>,茴香和茼蒿是低转运和低积累型;对于 Pb 而言,生菜是高转运和高积累型,茴香和小白菜是低转运和低积累型,对 As 而言,茼蒿、茴香和生菜是高转运和高积累型,菠菜是低转运和低积累型.

表 2 6 种叶菜的可食部位对 Cd、Pb 和 As 的富集系数<sup>1)</sup>

| Table 2 Bioaccumulation factors of Cd, Pb, and As in edible parts of six types of leafy vegetables |                    |                     |                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 蔬菜                                                                                                 | 富集系数               |                     |                     |
|                                                                                                    | Cd                 | Pb                  | As                  |
| 茴香                                                                                                 | 0.192 5 ± 0.023 6c | 0.001 3 ± 0.000 2b  | 0.006 4 ± 0.002 8ab |
| 茼蒿                                                                                                 | 0.200 0 ± 0.047 1c | 0.003 6 ± 0.001 3ab | 0.010 8 ± 0.003 9a  |
| 小白菜                                                                                                | 0.835 9 ± 0.048 7b | 0.001 9 ± 0.000 8b  | 0.005 1 ± 0.000 5ab |
| 菠菜                                                                                                 | 1.222 6 ± 0.135 6a | 0.003 5 ± 0.001 3ab | 0.001 9 ± 0.000 2b  |
| 油麦                                                                                                 | 0.837 5 ± 0.066 4b | 0.002 0 ± 0.000 8b  | 0.005 8 ± 0.000 4ab |
| 生菜                                                                                                 | 0.716 6 ± 0.125 6b | 0.006 3 ± 0.000 3a  | 0.008 7 ± 0.000 6a  |

1)小写字母表示 6 种叶菜同种重金属富集系数的差异性,下同

表 3 6 种叶菜中 Cd、Pb 和 As 由根系到可食部位的转运系数

| Table 3 Transfer factors of Cd, Pb, and As from root to shoot in leafy vegetables |                 |                |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 蔬菜                                                                                | 转运系数            |                |                 |
|                                                                                   | Cd              | Pb             | As              |
| 茴香                                                                                | 0.427 ± 0.030c  | 0.058 ± 0.010b | 0.528 ± 0.220a  |
| 茼蒿                                                                                | 0.838 ± 0.128c  | 0.344 ± 0.119a | 0.392 ± 0.114ab |
| 小白菜                                                                               | 1.864 ± 0.182a  | 0.076 ± 0.019b | 0.165 ± 0.004ab |
| 菠菜                                                                                | 1.314 ± 0.136b  | 0.112 ± 0.035b | 0.097 ± 0.013b  |
| 油麦                                                                                | 1.514 ± 0.111ab | 0.086 ± 0.040b | 0.193 ± 0.006ab |
| 生菜                                                                                | 1.340 ± 0.079b  | 0.349 ± 0.050a | 0.332 ± 0.023ab |

2.5 叶菜可食部位重金属 Cd、Pb 和 As 的健康风险评价

6 种叶菜中致癌化学物(Cd、As)和非致癌化学物(Pb)对成人和儿童人体健康风险值见表 4. 结果发现 6 种叶菜中 Cd 对成人和儿童的风险值均高于最大可接受风险水平  $1 \times 10^{-4}$  (摄入茴香除外,其风险值较低),说明其累积的 Cd 存在显著健康风险;6 种叶菜中 Pb 对成人和儿童的健康风险值均低于 1,表明其尚未对人体健康造成风险;茼蒿中 As 对成人的风险值及茼蒿、小白菜、油麦和生菜中砷对儿童的健康风险值均高于最大可接受风险水平  $1 \times$

$10^{-4}$ ,存在显著的健康风险,而菠菜和茴香中重金属 As 对成人和儿童的风险值在  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$  之间,有风险但可以接受. 6 种叶菜中 Cd 和 As 对儿童造成的健康风险高于成人.

表 4 叶菜中 Cd、Pb 和 As 对成人和儿童人体健康风险值

| Table 4 Human health risk values of Cd, Pb, and As in six leafy vegetables for adults and children |     |                        |          |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------|----------|-----------------------|
| 类型                                                                                                 | 项目  | $R_i$ (Cd)             | $H$ (Pb) | $R_i$ (As)            |
| 成人                                                                                                 | 茴香  | $0.33 \times 10^{-4}$  | 0.001    | $0.29 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 茼蒿  | $1.96 \times 10^{-4}$  | 0.013    | $2.52 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 小白菜 | $3.42 \times 10^{-4}$  | 0.004    | $0.50 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 菠菜  | $10.64 \times 10^{-4}$ | 0.016    | $0.38 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 油麦  | $3.99 \times 10^{-4}$  | 0.004    | $0.66 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 生菜  | $1.77 \times 10^{-4}$  | 0.008    | $0.55 \times 10^{-4}$ |
| 儿童                                                                                                 | 茴香  | $0.88 \times 10^{-4}$  | 0.003    | $0.79 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 茼蒿  | $5.27 \times 10^{-4}$  | 0.036    | $6.78 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 小白菜 | $9.202 \times 10^{-4}$ | 0.011    | $1.35 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 菠菜  | $28.62 \times 10^{-4}$ | 0.042    | $1.03 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 油麦  | $10.73 \times 10^{-4}$ | 0.012    | $1.77 \times 10^{-4}$ |
|                                                                                                    | 生菜  | $4.75 \times 10^{-4}$  | 0.022    | $1.48 \times 10^{-4}$ |

3 结论

(1)茼蒿、小白菜和菠菜分别为 Cd、Pb 和 As 的低转运和低积累型叶菜,茴香属于 Cd 和 Pb 均低

转运和低积累型叶菜。

(2)6 种设施叶菜可食部位 Cd、Pb 和 As 主要来源于土壤,其对叶菜可食部位 Pb 累积平均贡献率为 63.5%,大气沉降对叶菜可食部位 Pb 累积平均贡献率为 36.5%。

(3)大棚种植的 6 种设施叶菜均未超过食品安全国家标准(GB 2762-2017),其中叶菜中 Pb 不存在健康风险,但叶菜中累积的 Cd 对成人和儿童产生显著的健康风险(茴香除外),茼蒿中 As 对成人和儿童产生的健康风险也值得关注。

致谢:感谢华桂丽、冯柳旭、王秋实、睢康鑫和李翔宇等在采样和试验方面提供帮助,在此一并致谢!

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周雅,毕春娟,周泉潇,等. 上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5292-5298.  
Zhou Y, Bi C J, Zhou X X, *et al.* Distribution characteristics and health risk for heavy metals in vegetables near the industrial areas in Shanghai[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5292-5298.
- [3] Xue P Y, Zhao Q L, Sun H X, *et al.* Characteristics of heavy metals in soils and grains of wheat and maize from farmland irrigated with sewage[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(6): 5554-5563.
- [4] 孙洪欣,赵纪舒,付洁,等. 大气颗粒物对水芹和白菜可食部位铅镉砷累积的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(9): 3568-3575.  
Sun H X, Zhao J S, Fu J, *et al.* Effects of atmospheric particulate matters on accumulation of Pb, Cd, As in edible parts of cress and cabbage[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(9): 3568-3575.
- [5] El Hayek E, El Samrani A, Lartiges B, *et al.* Lead bioaccumulation in *Opuntia ficus-indica* following foliar or root exposure to lead-bearing apatite[J]. Environmental Pollution, 2017, **220**: 779-787.
- [6] Gao P P, Xue P Y, Dong J W, *et al.* Contribution of PM<sub>2.5</sub>-Pb in atmospheric fallout to Pb accumulation in Chinese cabbage leaves via stomata[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124356.
- [7] 肖冰,薛培英,韦亮,等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉砷铅污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2869-2877.  
Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [8] 申书兴. 河北省蔬菜产业发展形势与高质量发展对策[J]. 河北农业大学学报, 2020, **22**(4): 1-5.  
Shen S X. The current situation of Hebei vegetable industry and suggestions for its high-quality development[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, **22**(4): 1-5.
- [9] 黄宝同,徐永刚,宇万太,等. 不同轮作模式下设施菜地土壤和蔬菜中砷汞铬铅的分布特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, **29**(2): 212-219.  
Huang B T, Xu Y G, Yu W T, *et al.* Distribution characteristics of As, Hg, Cd, Cr, and Pb in soil and vegetable in protected vegetable field under different rotation modes[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, **29**(2): 212-219.
- [10] 李想,龙振华,朱彦彦,等. 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2239-2248.  
Li X, Long Z H, Zhu Y Y, *et al.* Zoning of cadmium and lead pollution for the safe production of facility leafy vegetables in northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2239-2248.
- [11] 李莲芳,朱昌雄,曾希柏,等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2936-2943.  
Li L F, Zhu C X, Zeng X B, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soil and vegetables in Siping City, Jilin province[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2936-2943.
- [12] 范远,刘李硕,宋凯悦,等. 山西中南部设施菜地重金属污染状况评估[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, **40**(1): 201-208.  
Fan Y, Liu L S, Song K Y, *et al.* Assessment of the heavy metal pollution of greenhouse vegetable land in central and southern Shanxi[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, **40**(1): 201-208.
- [13] Schreck E, Dappe V, Sarret G, *et al.* Foliar or root exposures to smelter particles: consequences for lead compartmentalization and speciation in plant leaves[J]. Science of the Total Environment, 2014, **476-477**: 667-676.
- [14] Uzu G, Sobanska S, Aliouane Y, *et al.* Study of lead phytoavailability for atmospheric industrial micronic and sub-micronic particles in relation with lead speciation[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(4): 1178-1185.
- [15] Kong S F, Lu B, Ji Y Q, *et al.* Risk assessment of heavy metals in road and soil dusts within PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>100</sub> fractions in Dongying city, Shandong province, China[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, **14**(3): 791-803.
- [16] 张焕焕. 上海市郊大气重金属干沉降对土壤-叶菜系统的污染效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.  
Zhang H H. Pollution effects of heavy metals in dry deposition on soil-vegetable system in suburban Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [17] 倪玮怡. 上海市郊土壤—蔬菜系统中重金属来源及贡献研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.  
Ni W Y. The sources and contribution research of heavy metals in soil-vegetable system at suburban areas in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [18] Gori A, Ferrini F, Fini A. Growing healthy food under heavy metal pollution load: overview and major challenges of tree based edible landscapes[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, **38**: 403-406.
- [19] 王世玉,吴文勇,刘菲,等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1550-1560.  
Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [20] 李春芳,曹见飞,吕建树,等. 不同土地利用类型土壤重金

- 属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [21] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk-based concentration table [R]. Washington DC: USEPA, 2000.
- [22] 程佳丽, 任硕, 刘婷婷, 等. 2001-2017 年我国部分地区蔬菜中砷和重金属累积特征及膳食暴露风险[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, **30**(2): 187-193.
- Cheng J L, Ren S, Liu T T, *et al.* Accumulation and dietary exposure risk of arsenic and heavy metals in the vegetables from some areas of China, 2001-2017[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2018, **30**(2): 187-193.
- [23] Wang S S, Yu R L, Shen H Z, *et al.* Chemical characteristics, sources, and formation mechanisms of PM<sub>2.5</sub> before and during the Spring Festival in a coastal city in Southeast China [J]. Environmental Pollution, 2019, **251**: 442-452.
- [24] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [25] 孟媛. 几种叶类蔬菜对镉砷的富集效应及其耐性机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- Meng Y. Accumulation of cadmium and arsenic in different leafy vegetables and tolerant mechanism [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2019.
- [26] 程珂, 杨新萍, 赵方杰. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(10): 1837-1845.
- Cheng K, Yang X P, Zhao F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(10): 1837-1845.
- [27] Sturges W T, Barrie L A. Lead 206/207 isotope ratios in the atmosphere of North America as tracers of US and Canadian emissions[J]. Nature, 1987, **329**(6135): 144-146.
- [28] 周泉涛, 毕春娟, 汪萌, 等. 大气沉降对叶菜重金属的污染效应及其健康风险[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018, (2): 141-150.
- Zhou X X, Bi C J, Wang M, *et al.* Pollution effects of atmospheric deposition on heavy metals in leafy vegetables and its health risk[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018, (2): 141-150.
- [29] 方凤满, 汪琳琳, 谢宏芳, 等. 芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(8): 1471-1476.
- Fang F M, Wang L L, Xie H F, *et al.* Enrichment characteristic and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Sanshan district, Wuhu city, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(8): 1471-1476.
- [30] Lin Y W, Liu T S, Guo H Y, *et al.* Relationships between Cd concentrations in different vegetables and those in arable soils, and food safety evaluation of vegetables in Taiwan [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, **61**(6): 983-998.
- [31] Xu L, Lu A X, Wang J H, *et al.* Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **122**: 214-220.
- [32] 陈小华, 白玉杰, 钱晓雍, 等. 4 种蔬菜对土壤 Mn 转运累积特征及食用安全性研究[J]. 生态毒理学报, 2020, **15**(2): 252-259.
- Chen X H, Bai Y J, Qian X Y, *et al.* Study on accumulation and transport of Mn in four vegetables and their edible safety[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, **15**(2): 252-259.
- [33] Zhang H H, Chen J J, Zhu L, *et al.* Transfer of cadmium from soil to vegetable in the Pearl River Delta area, South China[J]. PLoS One, 2014, **9**(9), doi: 10.1371/journal.pone.0108572.
- [34] 刘丽. 重金属在土壤—蔬菜系统中的迁移转运与调控及其健康风险评估[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- Liu L. Translocation, migration, and control of heavy metals and health risk assessment in soil-vegetable system [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                   |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China .....                                                                                                 | PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1 )                |
| Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review .....                                                                                                                        | CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> ( 11 )                |
| Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge .....                                                                                                      | ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> ( 26 )           |
| Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China .....                                                                                                          | RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 37 )        |
| Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China .....                             | ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> ( 46 )            |
| Real-time Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan .....                                                                  | JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> ( 61 )      |
| Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM <sub>2.5</sub> in Yuncheng City .....                                                                        | WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 74 )          |
| Three-dimensional Structure Variation of PM <sub>2.5</sub> During Cold Front Advance in Eastern China .....                                                                                       | MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen ( 85 )                                   |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                  | LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> ( 93 )             |
| Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China .....                                    | LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> ( 102 )                     |
| Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa .....                                                                                                                           | YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> ( 113 )               |
| Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period .....                                                                      | LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> ( 123 )             |
| Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb .....                                                                                                                    | JIN Dan ( 132 )                                                       |
| Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O <sub>3</sub> and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China .....                                                                         | YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> ( 140 )       |
| Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes .....                                                                | XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> ( 150 )        |
| Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels .....                                                 | WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> ( 160 )       |
| Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo .....                                                                                              | WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> ( 170 )            |
| Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City .....                                                                                             | PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> ( 180 )        |
| Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust .....                                                                                                                                  | FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> ( 189 )            |
| Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources .....                                                                                                   | SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> ( 199 )      |
| Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China .....                                                                             | WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> ( 210 )            |
| Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin .....                                                                                | LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> ( 220 )            |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake .....                                                | CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> ( 230 )       |
| Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals .....                                                        | LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> ( 239 )            |
| Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing ..... | HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> ( 247 )              |
| Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water .....                                                            | LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> ( 256 )           |
| DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course .....                                                                                           | LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> ( 267 )               |
| Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City .....                                                                                                            | YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> ( 277 )         |
| Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules .....                                        | XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> ( 285 )                |
| Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries .....                                                          | TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> ( 295 )                |
| Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification .....                                                                          | LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> ( 306 ) |
| Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir .....                                                                          | ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 314 )    |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China .....                                                                    | WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan ( 329 )                       |
| Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta .....                                          | LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> ( 339 )         |
| Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area .....                                 | ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> ( 349 )      |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers .....                                                                    | HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> ( 363 )   |
| Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration .....                                                                   | LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> ( 369 )      |
| Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO <sub>2</sub> Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area .....           | QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> ( 377 )         |
| Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red .....                                                                                                  | LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> ( 387 )  |
| Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter .....                                              | WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 398 )                     |
| Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment .....                                                                                           | DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 409 )            |
| Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community .....                                                         | WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> ( 416 )                 |
| Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics .....                                                                                                 | LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> ( 424 )       |
| Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model .....                                           | XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> ( 432 )             |
| Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China .....                                          | CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> ( 442 )          |
| Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products .....                                                                                  | WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> ( 454 )           |
| Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique .....                                                                              | SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> ( 463 )             |
| Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice .....                                                                 | LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> ( 472 )         |
| Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse .....                                                           | DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> ( 481 )         |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable .....                                                                | ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> ( 490 )     |
| Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula .....                                                   | LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> ( 500 )         |
| Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil .....                                                                                                                  | GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> ( 510 )                 |
| Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau .....                                                   | WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> ( 521 )     |
| Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion .....                                | JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 530 )       |
| Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community .....                                              | YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 540 )              |
| Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China .....                                  | XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> ( 550 )               |
| Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation .....                                                           | MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> ( 560 )         |
| Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain .....                  | WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> ( 569 )        |