

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 ..... 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达( 1 )  
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 ..... 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航( 13 )  
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的影响 ..... 贺祥,林振山( 22 )  
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 ..... 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法( 33 )  
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 ..... 张维,唐翔宇,鲜青松( 41 )  
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH<sub>4</sub> 与 CO<sub>2</sub> 浓度日动态 ..... 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川( 52 )  
河南鸡冠洞 CO<sub>2</sub> 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 ..... 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦( 60 )  
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 ..... 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽( 70 )  
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 ..... 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉( 78 )  
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 ..... 张维,唐翔宇,鲜青松( 87 )  
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 ..... 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻( 95 )  
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 ..... 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏( 104 )  
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 ..... 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆( 113 )  
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 ..... 杨毓,卢金锁,张颖( 121 )  
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 ..... 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜( 129 )  
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 ..... 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良( 138 )  
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 ..... 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶( 147 )  
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 ..... 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋( 156 )  
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 ..... 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文( 162 )  
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 ..... 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华( 170 )  
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 ..... 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰( 180 )  
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 ..... 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨( 188 )  
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 ..... 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑( 195 )  
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 ..... 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青( 201 )  
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 ..... 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼( 212 )  
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 ..... 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾( 220 )  
曝气生物滤池(Fe<sup>2+</sup>)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 ..... 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼( 229 )  
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 ..... 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松( 238 )  
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 ..... 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博( 247 )  
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 ..... 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明( 253 )  
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 ..... 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓( 260 )  
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 ..... 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良( 269 )  
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 ..... 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟( 276 )  
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 ..... 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫( 283 )  
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 ..... 史广宇,程媛媛,施维林( 294 )  
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 ..... 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔( 301 )  
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 ..... 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞( 309 )  
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 ..... 刘晋仙,李鑫,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰( 318 )  
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 ..... 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜( 327 )  
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 ..... 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤( 333 )  
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 ..... 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒( 343 )  
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 ..... 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园( 352 )  
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 ..... 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青( 361 )  
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 ..... 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云( 368 )  
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 ..... 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad( 374 )  
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 ..... 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊( 382 )  
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 ..... 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐( 389 )  
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 ..... 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰( 399 )  
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 ..... 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇( 405 )  
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 ..... 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月( 412 )  
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

# 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价

陈志良<sup>1</sup>, 黄玲<sup>1,2</sup>, 周存宇<sup>2\*</sup>, 钟松雄<sup>1</sup>, 王欣<sup>1</sup>, 戴玉<sup>1</sup>, 蒋晓璐<sup>1</sup>

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 长江大学园艺园林学院, 荆州 434025)

**摘要:** 蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物, 但蔬菜受重金属污染会对人体健康造成直接的威胁. 于广州市 12 个区(市) 采集 116 个蔬菜样品, 检测分析 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr 这 6 种元素, 通过单因子评估、内梅罗综合指数分析广州市蔬菜中重金属的超标因子与污染特征, 采用暴露风险分析评价食用当地种植蔬菜引起重金属对人体的健康风险. 结果表明, 8 种蔬菜中 Cu 与 Zn 的含量未超标; Cr 的超标率高达 91.67%; Pb 超标蔬菜为莴苣、丝瓜、番茄和胡萝卜, 超标率高达 35.71%, 以胡萝卜超标最为严重; Cd 超标的蔬菜为番茄, 超标率达 31.25%; Ni 超标的蔬菜包括油麦菜、空心菜与菜心, 超标率最高为 8.33%. 8 种蔬菜污染程度表现为: 空心菜、油麦菜、菜心、白萝卜和胡萝卜均处于警戒级, 而莴苣、丝瓜和番茄则处于安全级别; 4 类蔬菜的重金属综合污染程度呈现叶菜类 > 肉质根类 > 茎类菜 > 茄果类的趋势. 健康风险评估表明, 广州市居民中日常多食用空心菜、菜心和油麦菜的人群重金属累积的健康风险较高, 且经膳食摄入重金属 Cr 对人体健康可能会造成危害, 摄入 Cd 对人体具有潜在的健康风险. 经口摄入蔬菜重金属对儿童可能造成的暴露风险要高于成年人.

**关键词:** 蔬菜; 重金属; 污染特征; 健康评估; 广州市

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0389-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606138

## Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou

CHEN Zhi-liang<sup>1</sup>, HUANG Ling<sup>1,2</sup>, ZHOU Cun-yu<sup>2\*</sup>, ZHONG Song-xiong<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, DAI Yu<sup>1</sup>, JIANG Xiao-lu<sup>1</sup>

(1. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2. School of Horticulture and Garden, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

**Abstract:** Vegetable is an indispensable component of human daily diet, and contamination of vegetables by heavy metals directly threatens human health. In this study, 116 vegetable samples were collected from 12 administrative districts of Guangzhou City for analysis of six heavy metals, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr. A combination of single factor evaluation and Nemer Index analysis was employed to determine specific heavy metals exceeding allowable standards and analyze the characteristics of pollution. Risk of exposure was utilized to assess human health risks originating from eating locally planted vegetables contaminated by heavy metals. The results showed that contents of Cu, Zn in the 8 sorts of vegetables were below the standards of maximum allowable content and the contents of heavy metal Cr of up to 91.67% vegetable samples were higher than their standard. *Lettuce sativa* var. *angustana* Irish, *Luffa acutangula* L., *Lycopersicon esculentum* Mill. and *Daucus carota* L. were the 4 species of Pb exceeding vegetables, with the exceed ratio reaching up to 35.71% and *Daucus carota* L. exceeded the target value most seriously. Only the content of Cd in *Lycopersicon esculentum* Mill. was over-standard, with the rate of 31.25%. And the highest rate of over-standard of the content of Ni in 3 species of vegetables, which included *Lactuca sativa* L., *Ipomoea aquatica* Forsk and *Brassica parachinensis*, reached 8.33%. For the contamination level of the eight kinds of vegetable, *Lactuca sativa* L., *Ipomoea aquatica* Forsk, *Brassica parachinensis*, *Raphanus sativus* L. and *Daucus carota* L. were put into the class of alarming, while *Lettuce sativa* var. *angustana* Irish, *Luffa acutangula* L. and *Lycopersicon esculentum* Mill. were classified as secure. Heavy metals' comprehensive pollution degree of 4 species of vegetables presented a trend of leafy vegetables > rootstalk vegetables > stem vegetables > solanaceous fruits. Health risk assessment showed that Guangzhou citizens eat more frequently *Ipomoea aquatica* Forsk and *Lactuca sativa* L. and *Brassica parachinensis* were prone to higher accumulation of heavy metals, and the dietary intake of heavy metal Cr might cause harm to human health and intake of Cd would bring potential health risk to the human body. Risk of exposure to heavy metal through oral ingestion of vegetables was proved to be higher for children than adults.

**Key words:** vegetable; heavy metal; pollution characteristic; health evaluation; Guangzhou

蔬菜作为人们日常生活中必不可少的食物, 是保障人体基本营养特别是各种微量元素和膳食纤维

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-08-27

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2012B091000152); 广东省科技计划项目(2013B020700010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(pm-zx021-201410-023); 广州市科技计划项目(201504291014107, 2016201604030017)

作者简介: 陈志良(1976~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤污染控制与地下水防治, E-mail: chenzhiliang@scies.org

\* 通信作者, E-mail: zhoucy@yangtzeu.edu.cn

的最主要的膳食组成,其质量安全直接关系到人体健康.广州市作为珠江三角洲地区的核心城市之一,其经济发达、人口稠密,对蔬菜的需求量极大.然而,城市蔬菜中重金属含量不容乐观.目前,就广州市蔬菜中重金属的调查已有不少研究报道<sup>[1-9]</sup>,但多集中于某一区域或部分区域内蔬菜中重金属的调查研究,而较全面地对广州市蔬菜进行调查并经食用蔬菜摄入重金属对广州居民健康风险的系统评估研究较少.为此,本文在广州市各区农贸市场选择日常食用的蔬菜为调查对象,分析蔬菜中重金属的含量水平及污染特征,利用健康风险评估模型探讨含重金属蔬菜可能的健康风险,旨在为广州市蔬菜重金属污染详细调查与重金属污染溯源与防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

广州市是广东省省会,地处中国大陆南方,广东省中南部,珠江三角洲的中部,濒临南海,素有中国“南大门”之称.地理坐标东经 112°57'~114°03',北纬 22°33'~23°57'.广州市辖越秀、海珠、荔湾、天河、白云、黄埔、花都、番禺、南沙、萝岗等十区和从化、增城两个县级市,总面积 7 434.4 km<sup>2</sup>.该

市地形总体呈北高南低,最高峰为北部从化市与龙门县交界处的天堂顶,海拔为 1 210 m.东北部为中低山区,中部为丘陵盆地,南部是珠江三角洲冲积平原.广州地处亚热带沿海,北回归线从中南部穿过,属海洋性亚热带季风气候,以温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短为特征.全年平均气温 21.9℃,是中国年平均温差最小的大城市之一.一年中最热的月份是 7 月,月平均气温达 28.7℃.最冷月为 1 月,月平均气温为 13.5℃.平均相对湿度 77%,年降雨量约为 1 736 mm.粮食作物以水稻为主,一年两熟.经济作物以蔬菜、水果、花卉等为主.

### 1.2 蔬菜样品采集

根据广州市居民日常消费蔬菜情况,供试蔬菜确定为广州市主要蔬菜农贸市场春季的 4 大类 8 种市售蔬菜,主要包括叶类蔬菜(油麦菜 *Lactuca sativa* L.、空心菜 *Ipomoea aquatica* Forsk.)、茄果类蔬菜(番茄 *Lycopersicon esculentum* Mill.、丝瓜 *Luffa acutangula* L.)、茎类蔬菜(菜心 *Brassica parachinensis*、茎用莴苣 *Lettuce sativa* var. *angustana* Irish)、肉质根类蔬菜(白萝卜 *Raphanus sativus* L.、胡萝卜 *Daucus carota* L.)等共 8 种蔬菜.具体抽样分布见表 1.抽样调查时间为 2015 年 5 月,分 3 次进行取样(5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日).

表 1 广州市蔬菜采样点及样品数初步统计

Table 1 Guangzhou City' vegetable sampling sites and sample amount for preliminary statistics

采样区	抽样数 /个	采样数 /个	采样区	抽样数 /个	采样数 /个	采样区	抽样数 /个	采样数 /个
白云区	2	16	花都区	2	16	南沙区	1	8
天河区	1	8	番禺区	1	8	萝岗区	2	11
越秀区	1	8	黄埔区	1	8	从化市	2	10
海珠区	1	8	荔湾区	1	8	增城市	1	7
合计	16	116	—	—	—	—	—	—

在 3 次不同时间采样时,每一次采样过程将 4 类 8 种蔬菜全部采集齐,且每次在不同农贸市场采集不同种蔬菜时应随机取 3 个摊位的蔬菜作为一个混合样并装于干净的塑料袋中,每种样品采集 0.5~1 kg,贴好标签并做记录.本研究采样点分布见图 1.

### 1.3 蔬菜样品前处理

将采集的蔬菜样品(不同类型蔬菜均只留可食部分)先用自来水充分冲洗以去除黏附于上的杂质然后用去离子水冲洗至少 3 遍,沥去水分并用滤纸吸去表面水分,切碎、混匀,然后烘干(先于 105℃下杀青 30 min,然后在 85℃烘箱中烘 1~2 h 至恒重),烘干后的植物样品用药物研磨机进行粉碎,过

100 目筛于密封袋中保存备用.

### 1.4 样品分析方法

#### 1.4.1 蔬菜样品水份测定

蔬菜等污染物含量常以鲜重表示,本研究中使用风干粉碎的蔬菜样品测定重金属含量,故以鲜量表示时应测蔬菜中水分<sup>[10]</sup>,具体方法如下:

风干前称取一定量的鲜样,单独风干后称至恒重,按式(1)计算水分系数.

$$\text{水分系数} = \frac{\text{样品鲜重}}{\text{样品风干重}} \quad (1)$$

风干后蔬菜样品种重金属含量除以水分系数即为新鲜蔬菜样品中重金属含量.

#### 1.4.2 蔬菜中重金属含量测定

称取样品 0.500 0 g,以 4:1(HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub>)的混



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sample point distribution

酸比例于石墨消解仪上进行消解。蔬菜中重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr)均采用原子吸收 AA-7000(岛津公司,日本)及电感耦合等离子体原子发射光谱仪 ICP-OES710(安捷伦公司,美国)进行测定,各检测指标均严格按照国标要求进行,具体见表 2。

对采集的蔬菜样品重复测定 3 次,取平均值作为蔬菜样品重金属含量;所有元素的回收率介于

95% ~ 105% 之间,每批次实验过程中空白样品和质控样品(国家标准植物样品:圆白菜 GSB-5)进行同步测定,符合质控要求。

表 2 蔬菜中重金属检测标准

Table 2 Heavy metals testing standards in vegetables

重金属元素	国家标准
Cu	GBT 5009.13-2003
Zn	GBT 5009.14-2003
Pb	GBT 5009-2010
Cd	GBT 5009.13-2003
Ni	GBT 5009.138-2003
Cr	GBT 5009.123-2003

1.5 数据处理与分析

实验数据采用 Excel 2007 进行整理;实验结果用 SPSS 19.0 统计分析软件进行分析;实验作图采用 Origin 8.0 软件。

1.6 重金属污染评价标准

1.6.1 单因子评价

蔬菜重金属超标率、超标倍数采用公式(2)和(3)来进行计算。

超标率:

$$C_i(\%) = (n_i/N_i) \times 100 \quad (2)$$

超标倍数:

$$m = (P_i - S_i)/S_i \quad (3)$$

式中,  $C_i$  为重金属在蔬菜中的超标率;  $P_i$  为蔬菜中重金属的实测值;  $n_i$  为蔬菜中重金属超标样品数;  $S_i$  为重金属对应的质量标准;  $N_i$  为蔬菜的样品数;  $m$  为蔬菜产品重金属超标倍数。

蔬菜中不同重金属元素限量标准见表 3。

表 3 蔬菜中各重金属元素食品卫生标准限值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Food sanitation standard limit of heavy metal elements in vegetables/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

元素	限量标准(以鲜重计)	标准来源
Pb	$\leq 0.30$ (叶类蔬菜、芸薹类蔬菜)	《食品中污染物限量》GB 2762-2012
	$\leq 0.10$ (除叶类蔬菜、芸薹类蔬菜、豆类、薯类外)	
	$\leq 0.20$ (叶类蔬菜)	
Cd	$\leq 0.10$ (块根和块茎类蔬菜、茎类蔬菜)	《食品中污染物限量》GB 2762-2012
	$\leq 0.05$ (其它蔬菜)	
Cr	$\leq 0.50$	《食品中污染物限量》GB 2762-2012
Ni	$\leq 0.30$	1994 年全国食品卫生标准分委会评审通过作为内控标准
Cu	$\leq 10$	《食品中铜限量卫生标准》GB 15199-94
Zn	$\leq 20$	《食品中锌限量卫生标准》GB 13106-91

1.6.2 重金属污染程度综合评价

为深入分析广州市市售蔬菜中重金属污染程度,以不同种类市售蔬菜重金属的平均含量为评价依据,采用内梅罗综合指数法进行评价。

(1) 蔬菜重金属污染评价方法

内梅罗综合指数法可用来评价每个采样点的样品重金属综合污染水平,是国内普遍采用的综合评价方法之一,其计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{i\text{max}}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}} \quad (4)$$

$$P_i = C_i/S_i \quad (5)$$

式中,  $P_{\text{综}}$  为内梅罗综合指数,  $P_{i\text{ave}}$  为农产品单因子污染指数的平均值,  $P_{i\text{max}}$  为农产品单因子污染指数的最大值,  $P_i$  为农产品中污染物  $i$  单因子污染指数, 反映的是某一污染物超标倍数和程度;  $C_i$  为农产品中污染物  $i$  含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准 (表 2 中蔬菜的各重金属元素食品卫生标准限值)。

## (2) 蔬菜质量分级

参考《绿色食品产地环境质量状况评价纲要(试行)》(1994)中土壤污染等级划分标准制定蔬菜质量分级标准, 具体见表 4。

表 4 蔬菜质量分级标准

等级划分	$P_{\text{综}}$	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清洁
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻度污染	农作物开始受到污染
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中度污染	农作物受中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	重度污染	农作物受污染已相当严重

## 1.7 蔬菜环境健康风险评估

健康风险评估采用风险系数 (HQ) 被运用于评估重金属经口摄入后的非致癌健康风险<sup>[11]</sup>。HQ 是某种污染物的确定剂量与参考剂量的比率, 且当比率小于 1 时暴露人群不会因污染物而产生不良反应, 也就是说明该污染物对人体健康不会造成危害。重金属的风险系数由计算公式(6)进行计算:

$$HQ = \frac{EDI}{EFd} = \frac{c_{\text{veg}} \times IR_{\text{veg}} \times EF_{\text{veg}} \times ED}{BW \times AT \times Rfd} \quad (6)$$

式中, EDI 为每日摄入重金属的估计值, 其取决于蔬菜中重金属含量与蔬菜的消耗量; Rfd 为非致癌口服参考剂量,  $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 其被视为评估的关键参数: 即人群在终生接触该剂量水平化学物质的条件下, 一生中很可能不会发生非致癌有害效应的危险<sup>[12]</sup>;  $c_{\text{veg}}$  为各蔬菜可食用部分中重金属的含量 (以鲜重计),  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $IR_{\text{veg}}$  为蔬菜人均日消耗量,  $\text{kg}\cdot(\text{d}\cdot\text{人})^{-1}$ ;  $EF_{\text{veg}}$  为重金属年暴露天数,  $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ; ED 为暴露年限, a; BW 为人体平均体重, kg; AT 为非致癌暴露总时间 ( $ED \times 365$ ), d。蔬菜重金属的风险系数 (HQ) 的计算分别对儿童 (3~12 岁) 与成年人 (18~45 岁) 进行计算。

危害指数 (HI) 表示当几种污染物/重金属同时存在时, 所有重金属的风险系数之和<sup>[13]</sup>, 其计算公

式(7)如下:

$$HI = \sum_{i=0}^n HQ_i \quad (7)$$

式中,  $i$  为第  $i$  种化学物质 (重金属) 或暴露途径。在这种情况下, 非致癌物质的可接受风险为危险指数  $< 1.0$ ; 若危险指数  $> 1.0$ , 则可能存在非致癌影响。

蔬菜可食部分重金属经口摄入的风险系数计算参数见表 5。

表 5 蔬菜重金属经口摄入的风险系数计算

Table 5 Hazard quotient calculation of heavy metals in vegetables through oral intake

计算参数	数据	文献
	Pb	0.004 [14]
	Cd	0.001 [15]
6 种重金属的 RfD 值 $/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	Ni	0.02 [16]
	Cr	0.003 [17]
	Cu	0.04 [18]
	Zn	0.3 [19]
$C_{\text{veg}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	见表 2~5	本研究
$IR_{\text{veg}}/\text{kg}\cdot(\text{d}\cdot\text{人})^{-1}$	儿童:0.233; 成人:0.355	[20]
$EF_{\text{veg}}/\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	350	[20]
ED/a	儿童:6; 成人:30	[20]
BW/kg	儿童:24.5; 成人:60.3	[20]
AT/d	儿童:2190; 成人:10950	[20]

## 2 结果与讨论

### 2.1 广州市蔬菜中重金属含量水平

表 6 数据统计结果表明, 8 种蔬菜可食部分中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Cr 的含量范围分别为 0.140 ~ 1.857、0.956 ~ 7.142、0.003 ~ 0.221、0.005 ~ 0.106、0.012 ~ 0.813 及 0.031 ~ 1.937  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由此可见, 蔬菜可食部分中 Zn 含量相对最高, Pb、Cd 含量相对最少。4 大类蔬菜样品中叶菜类蔬菜 6 种重金属含量普遍较高, 而茄果类蔬菜中重金属 Zn、Cd、Pb、Ni 含量与肉质根类蔬菜中 Cu、Cd 则相对较低。可见, 不同种类蔬菜对重金属的富集含量有较大差异, 且叶类蔬菜较其它 3 大类蔬菜更易吸收富集这 6 种重金属。Zurera-Cosano 等<sup>[21]</sup>调查研究表明, 蔬菜品种间重金属含量呈极显著差异, 不同种类的蔬菜具有不同的生物学特性, 对重金属的吸收积累量明显不同。大量研究也表明, 叶类蔬菜之所以成为重金属污染的重灾区, 是由于叶片等器官末端的蒸发量较大, 极易发生含有毒重金属等污染物的富集, 同时叶类蔬菜叶片量较多, 易受到大气粉尘中重金属的污染<sup>[15,22]</sup>。

表 6 蔬菜中重金属含量(以鲜重计)及其分布特征/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 6 Concentrations and distribution characteristics of heavy metals in vegetables/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 

蔬菜类别	蔬菜名称及样本数	Cu		Zn		Pb		Cd		Ni		Cr	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
叶菜类	油麦菜(15个)	0.316~1.043	0.598	1.625~5.370	2.884	0.046~0.149	0.078	0.031~0.106	0.061	0.033~0.813	0.114	0.232~1.937	0.557
	空心菜(15个)	0.314~1.857	0.921	2.148~6.468	3.843	0.0755~0.182	0.119	0.009~0.058	0.028	0.069~0.533	0.163	0.331~1.028	0.609
茄果类	丝瓜(16个)	0.317~0.976	0.598	1.927~4.324	2.755	0.038~0.151	0.063	0.009~0.028	0.017	0.042~0.284	0.116	0.248~0.775	0.447
	番茄(16个)	0.323~1.008	0.527	1.065~2.556	1.657	0.003~0.121	0.031	0.005~0.078	0.029	0.012~0.078	0.031	0.031~1.231	0.140
茎菜类	菜心(12个)	0.216~0.631	0.464	2.103~7.142	4.756	0.063~0.166	0.108	0.016~0.098	0.038	0.079~0.462	0.160	0.324~0.868	0.597
	茼蒿(14个)	0.269~0.728	0.427	0.956~3.208	2.067	0.034~0.132	0.076	0.010~0.036	0.020	0.028~0.226	0.081	0.052~0.710	0.321
肉质根类	白萝卜(14个)	0.140~0.303	0.203	1.446~3.593	2.061	0.0313~0.096	0.058	0.013~0.037	0.022	0.051~0.249	0.133	0.360~0.692	0.468
	胡萝卜(14个)	0.239~0.596	0.366	1.104~3.961	2.195	0.037~0.221	0.097	0.010~0.048	0.020	0.037~0.141	0.085	0.072~0.196	0.137

结合表 6 与图 2 可看出,蔬菜鲜重中 Cu 含量平均值从高到低依次是:空心菜 > 油麦菜 = 丝瓜 > 番茄 > 菜心 > 茼蒿 > 胡萝卜 > 白萝卜; Zn 含量平均值从高到低依次是:菜心 > 空心菜 > 油麦菜 > 丝瓜 > 胡萝卜 > 茼蒿 > 白萝卜 > 番茄; Pb 含量平均值从高到低依次是:空心菜 > 菜心 > 胡萝卜 > 油麦菜 > 茼蒿 > 丝瓜 > 白萝卜 > 番茄; Cd 含量平均值从高到低依次是:油麦菜 > 菜心 > 番茄 > 空心菜 > 白萝卜 > 胡萝卜 = 茼蒿 > 丝瓜; Ni 含量平均值从高到低依次是:空心菜 > 菜心 > 白萝卜 > 丝瓜 > 油麦菜 > 胡萝卜 > 茼蒿 > 番茄; Cr 含量平均值从高到低依次是:空心菜 > 菜心 > 油麦菜 > 白萝卜 > 丝瓜 > 茼蒿 > 番茄 > 胡萝卜。总体来看,空心菜对多种重金属都具有吸收能力,因此空心菜的产地环境质量是一个值得关注的问题。

纵观上述结果,不同种类蔬菜对 6 种重金属的吸收、富集能力不同,其原因可能在于蔬菜植株活化土壤中不溶态的重金属,再将其由根系转运至植株地上部,富集能力较强的蔬菜其转运能力相对而言会稍强,因此不同蔬菜中重金属的含量差异较明显<sup>[23]</sup>。显然,这只是影响因素之一,因为蔬菜根际因素、根系因素及植物重金属螯合肽等也是造成蔬菜中重金属含量不同的重要因素<sup>[24]</sup>。

## 2.2 与历年来广州市蔬菜中重金属含量的研究结果进行比较

表 7 是广州市售蔬菜中重金属含量与前人在 1998~2011 年间对广州市蔬菜中重金属的研究结果的对比。可以看出,与前人对广州市蔬菜体内 6 种重金属的结果相比,本研究蔬菜样品中 Cr 含量处于较高水平,Pb、Cd、Ni 含量处于中间水平,Cu、Zn 含量均偏高,但不同时期研究的蔬菜中不同种重金属含量的均值/范围差异较大,其原因可能是由蔬菜样品来源及数量、蔬菜不同品种累积重金属的能力

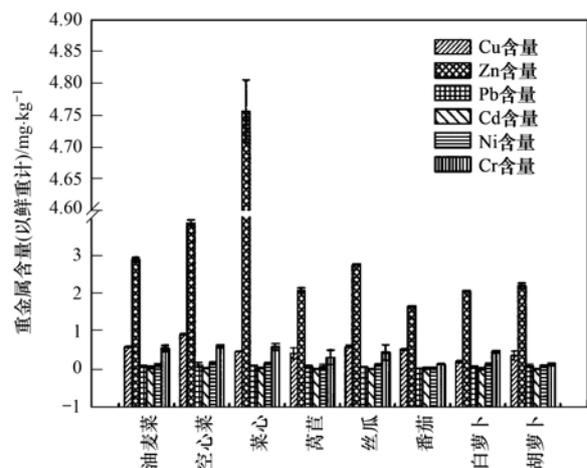


图 2 8 种蔬菜中重金属含量

Fig. 2 Heavy metals' content in different kinds of vegetables

以及其生存环境等存在差异而造成。

## 2.3 8 种蔬菜中重金属超标分析

本研究 8 种蔬菜中重金属超标情况见表 8。结合图 3 可看出,所检测的 116 个市售蔬菜样品中 Cr 的超标率比较高,8 种蔬菜中除胡萝卜外均有超标,涉及到研究的 4 种不同类型的蔬菜,超标率范围在 6.25%~91.67%,且尤以油麦菜 Cr 超标最为严重(最高含量是国家标准限值的 2.87 倍),这与秦文淑等<sup>[1,4]</sup>的研究结论具有一致性,这说明所检测的蔬菜样品中 Cr 污染较严重,需加强对蔬菜 Cr 污染的关注;Pb 超标的蔬菜种类包括茼蒿、丝瓜、番茄和胡萝卜,超标率范围在 6.25%~35.71%,以胡萝卜 Pb 超标最为严重,最高含量是国家标准限值的 1.21 倍;Cd 超标的蔬菜只有番茄,超标率达 31.25%且最高含量是国家标准限值的 0.57 倍;Ni 超标的蔬菜包括油麦菜、空心菜与菜心,超标率分别为 6.67%、6.67%与 8.33%,超标倍数依次为 1.71 倍、0.78 倍与 0.54 倍,可见叶类蔬菜中 Ni 超标较严重。

表 7 广州市蔬菜重金属含量与前人研究结果比较(鲜重)<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 7 Comparison of contents of heavy metals in vegetables from different studies (fresh weight)/mg·kg<sup>-1</sup>

时间	蔬菜样品来源	Cr	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	文献
1998	白云区江高镇蔬菜生产基地	(0.10~0.27)	(0.04~0.10)	(0.01~0.03)	(0.13~0.22)	(0.27~0.55)	(2.14~4.82)	[8]
1999-10~2000-03	292个; 95个蔬菜种植地块	0.040 (0.002~0.150)	0.048 (0.002~0.148)	0.007 (0.001~0.034)	—	—	—	[6]
2000~2002	蔬菜批发市场及零售市场	(0.530~0.720)	(0.210~3.730)	(0.060~0.910)	—	—	—	[3]
2005	菜市场	(0.18~1.26)	(0.04~1.50)	(0.01~0.05)	(0.06~2.06)	(0.17~1.26)	(0.06~2.06)	[1]
2007	超市及菜市场	—	(0.054~0.162)	(0~0.043)	—	0.200~0.831	—	[7]
2008	菜地	0.49	—	0.03	—	0.49	2.1	[4]
2009-10~2009-11	蔬菜种植地	—	(0.061~0.210)	(0.019~0.071)	—	—	—	[5]
2010-08	蔬菜生产基地	0.076	0.041	0.027	—	—	—	[2]
2011	菜地	0.05	0.04	0.01	—	—	—	[9]
2015-05	116个; 蔬菜农贸市场	0.410 (0.031~1.937)	0.079 (0.003~0.221)	0.029 (0.005~0.106)	0.110 (0.012~0.813)	0.513 (0.140~1.857)	2.777 (0.956~6.468)	本研究

1) “—”表示无数据; 括号中的数字代表范围

表 8 蔬菜重金属含量超标情况<sup>1)</sup>

Table 8 Heavy metal exceed standard situation in vegetables

蔬菜名称	重金属元素											
	Pb		Cd		Ni		Cr		Cu		Zn	
	超标率/%	最大超标倍数										
空心菜	—	—	—	—	6.67	0.78	73.33	1.06	—	—	—	—
油麦菜	—	—	—	—	6.67	1.71	40.00	2.87	—	—	—	—
菜心	—	—	—	—	8.33	0.54	91.67	0.74	—	—	—	—
茼蒿	21.43	0.32	—	—	—	—	14.29	0.42	—	—	—	—
丝瓜	6.25	0.51	—	—	—	—	25.00	0.55	—	—	—	—
番茄	6.25	0.21	31.25	0.57	—	—	6.25	1.46	—	—	—	—
白萝卜	—	—	—	—	—	—	21.43	0.07	—	—	—	—
胡萝卜	35.71	1.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1) “—”代表样品中重金属含量未超标

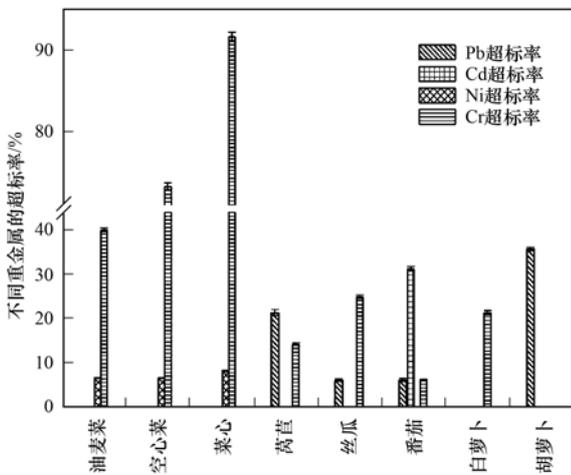


Fig. 3 Exceeding standard rate of heavy metals in vegetables

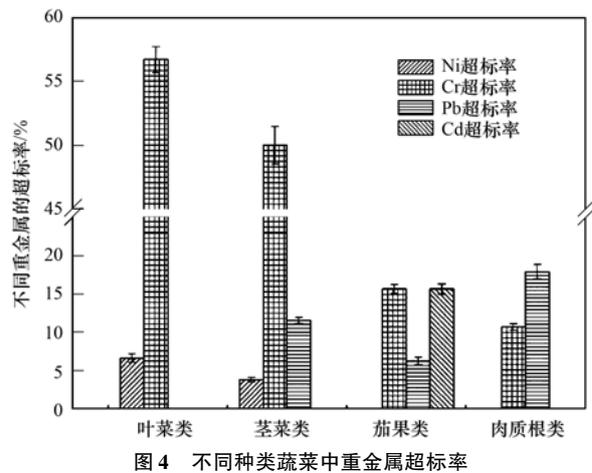


Fig. 4 Exceeding standard rate of heavy metals in different kinds of vegetables

2.4 不同种类蔬菜中重金属超标分析

不同种类蔬菜中重金属超标率表明(图 4), 所

检测的 4 大类蔬菜对 Pb、Cd、Ni、Cr 这 4 种不同重金属的富集吸收能力各不相同. 不同种类蔬菜对某

一种重金属的富集能力存在差异. 具体表现为:蔬菜重金属 Cr 污染超标呈现叶菜类 > 茎菜类 > 茄果类 > 肉质根类的总体趋势; Pb 污染超标呈现肉质根类 > 茎菜类 > 茄果类的趋势; Ni 污染超标呈现叶菜类 > 茎菜类 > 茄果类的趋势.

同种蔬菜对不同的重金属 (Pb、Cd、Ni、Cr) 富集能力也存在差异. 具体表现为:叶菜类中 Cr 的超标率远高于 Ni 的超标率; 茎菜类中重金属的超标率呈现 Cr > Pb > Ni 的趋势; 茄果类中重金属的超标率呈现 Cr = Cd > Pb 的趋势; 肉质根类中重金属的超标率呈现 Pb > Cr 的趋势.

综合分析可知,重金属 Cr、Pb 为本次抽检的蔬菜样品中主要污染物,且叶菜类蔬菜中 Cr 污染相对其它 3 类蔬菜最严重,这与姚春霞等<sup>[25]</sup>的研究结论基本一致,但与杜景东等<sup>[26]</sup>的研究结论则恰恰相反,其研究发现根茎类蔬菜中 Cr 污染要高于叶菜类. 蔬菜中 Cr 污染来源可能包括以下 3 方面:①与近年来广州地区大量汽车产生的尾气排放及化肥(尤其是磷肥)的施用有关,因为 Cr 来源较为广泛,但最主要仍是工业含 Cr 废气和废水的排放;②煤和石油燃烧的废气中含有颗粒态 Cr;③化肥中 Cr 的含量也较高,其中尤以磷肥的 Cr 含量最高<sup>[27]</sup>. 造成以上结论差异的原因可能与样品采集的地域差

异、蔬菜的种植环境(或来源)及蔬菜本身的生理特性等有较大关系. 王晓慧<sup>[19]</sup>的研究也表明,蔬菜中重金属的含量除了与土壤重金属的污染程度与重金属元素的性质相关,还与蔬菜本身对不同重金属的选择性吸收有关. 可见,蔬菜中重金属含量的差异性是由多方因素的综合影响而产生的.

本研究发现所检测的叶菜类蔬菜中 Pb 含量相对最高,而肉质根类蔬菜中 Pb 超标情况较茎菜类、茄果类蔬菜严重. 此结果一方面说明了叶菜类蔬菜较其它蔬菜更易吸收富集 Pb,这与方凤满等<sup>[28]</sup>、杨国义等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,且蔬菜中 Pb 来源主要包括:①种植土壤;②灌溉用水;③大气污染,赵凯等<sup>[2]</sup>研究表明含 Pb 汽油的使用是导致位于交通繁忙地带或毗邻高速公路附近的蔬菜基地内蔬菜中 Pb 含量较高的一个重要原因(以大气污染为主要来源的气态或尘态 Pb,在叶菜类的表面吸附能力较强<sup>[30]</sup>);另一方面,与前人的研究结果<sup>[3,23]</sup>相比,本研究蔬菜中重金属 Pb 的超标情况差异较大,这可能与蔬菜根系对重金属的吸收累积量高于茎和叶<sup>[31]</sup>有关.

## 2.5 蔬菜重金属污染评价

对 8 种蔬菜中 6 种重金属进行内梅罗综合指数评价,结果见表 9.

表 9 蔬菜重金属污染状况

Table 9 Pollution index of heavy metals in vegetables

蔬菜名称	单项污染指数						综合污染指数	污染等级
	Pb	Cd	Ni	Cr	Cu	Zn		
空心菜	0.397	0.140	0.543	1.218	0.092	0.005	0.906	警戒级
油麦菜	0.260	0.305	0.380	1.114	0.060	0.003	0.826	警戒级
菜心	0.360	0.380	0.533	1.194	0.046	0.002	0.895	警戒级
茼蒿	0.760	0.200	0.270	0.642	0.043	0.002	0.583	安全
丝瓜	0.630	0.340	0.387	0.894	0.060	0.003	0.688	安全
番茄	0.310	0.580	0.103	0.280	0.053	0.003	0.439	安全
白萝卜	0.580	0.220	0.443	0.936	0.020	0.001	0.711	警戒级
胡萝卜	0.970	0.200	0.283	0.274	0.037	0.002	0.717	警戒级

评价结果显示,广州市市售蔬菜均没有超过食用安全警戒线 1.0. 从污染等级来看,空心菜、油麦菜、菜心、白萝卜和胡萝卜均处于警戒级,而茼蒿、丝瓜和番茄则属于安全级别. 从综合污染指数来看,不同种类蔬菜的综合污染指数排序为:空心菜 > 菜心 > 油麦菜 > 胡萝卜 > 白萝卜 > 丝瓜 > 茼蒿 > 番茄. 空心菜的综合污染指数最高,略小于 1,处于警戒级,这与杨国义等<sup>[29]</sup>的研究结论具有相似性,说明空心菜的污染相对最严重;其中 Cr 的单项污染指数较高,达到 1.218,其余 5 种重金属单因子污染

指数均低于 0.6; 6 种重金属的单项污染指数从大至小顺序为 Cr > Ni > Pb > Cd > Cu > Zn,可见空心菜重金属污染的主要元素是 Cr. 番茄的综合污染指数最低(0.439),小于 0.7,处于安全级别;其 6 种重金属单项污染指数均低于 0.6.

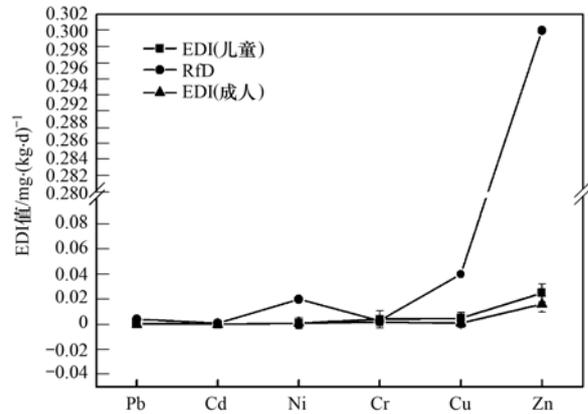
总体来看,蔬菜中重金属污染程度为叶菜类 > 肉质根类 > 茎类菜 > 茄果类,这一结论与胡霓红等<sup>[16]</sup>的研究结果具有一致性. 蔬菜对重金属的富集除了经由叶片对大气中气态铅、汞等的微量吸收外,主要是经植物根系从土壤中大量吸收. 重金属

经土壤-植物体系进入蔬菜叶片中又受到根系-土壤界面与根-茎叶界面的阻隔影响,而若重金属要被植株果实部分吸收,还会受到茎叶-果实界面的阻隔<sup>[17]</sup>. 为此,叶类蔬菜对重金属的富集能力较强.

### 2.6 蔬菜健康风险评估

依据 8 种蔬菜中重金属的平均含量及儿童与成人各自的蔬菜消耗量,对儿童与成人两种人群分别进行了不同种蔬菜中重金属的每日摄入量(EDI)及风险系数(HQ)的估算. 结果表明,对儿童与成人而言,重金属 Cu、Pb、Ni 和 Cr 的 EDI 最大值均来源于对空心菜的食用,且除 Cr 的 EDI 最大值超出 RfD 值外,其它重金属的 EDI 最大值均远小于 RfD 值<sup>[18]</sup>,这与王晓慧<sup>[19]</sup>的研究结论刚好相反;而 Zn、Cd 的 EDI 最大值则分别来源于对菜心、油麦菜的食用,其 EDI 最大值均远小于 RfD 值<sup>[20]</sup>. 因此,食用空心菜、菜心和油麦菜使得当地居民重金属累积的健康风险可能性更高,且 Cr 经人体对叶类蔬菜的摄入是造成 Cr 元素在人体富集的重要途径,必须改善 Cr 污染的蔬菜生长环境. 同时,尽管其他重金属的 EDI 最大值远小于 RfD 值,但不能保证是完全安全的,因为 Rattan 等<sup>[32]</sup>研究表明,除了蔬菜暴露外,

人体还可从大气、水、肉食等渠道富集重金属,所以 EDI 值并不能完全代表人体中富集的所有重金属的健康风险. 结合图 5 可知,蔬菜重金属对儿童可能造成的暴露风险要高于成年人,这又与王晓慧<sup>[19]</sup>、Zheng 等<sup>[33]</sup>的研究结论相似.



图中 RfD 值为评估参考限值,EDI 为估算值,两者代表含义一致,故共用同一纵坐标

图 5 儿童及成人的每日摄入重金属量(EDI)

Fig. 5 Daily intake heavy metals of children and adults(EDI)

表 10 是对 8 种蔬菜重金属的风险系数(HQ)的统计结果. 观察可知,6 种重金属元素 HQ 的最大

表 10 8 种蔬菜重金属的风险系数(HQ)

Table 10 Hazard index(HQ)of heavy metals in 8 kinds of vegetables

蔬菜名称	6 种重金属的风险系数/HQ											
	Cu		Zn		Pb		Cd		Ni		Cr	
	HQ <sub>儿童</sub>	HQ <sub>成人</sub>										
油麦菜	0.136	0.017	0.088	0.292	0.178	0.001	0.556	0.344	0.052	0.032	1.693	1.048
空心菜	0.210	0.026	0.117	0.389	0.271	0.002	0.255	0.158	0.074	0.046	1.851	1.146
丝瓜	0.136	0.017	0.084	0.279	0.144	0.001	0.155	0.096	0.053	0.033	1.359	0.841
番茄	0.120	0.015	0.050	0.168	0.071	0.000	0.264	0.164	0.014	0.009	0.426	0.263
菜心	0.106	0.013	0.145	0.482	0.246	0.001	0.347	0.215	0.073	0.045	1.815	1.123
莴苣	0.097	0.012	0.063	0.209	0.173	0.001	0.182	0.113	0.037	0.023	0.976	0.604
白萝卜	0.046	0.006	0.063	0.209	0.132	0.001	0.201	0.124	0.061	0.038	1.423	0.881
胡萝卜	0.083	0.010	0.067	0.222	0.221	0.001	0.182	0.113	0.039	0.024	0.416	0.258

值从大到小依次为 Cr > Cd > Pb > Zn > Cu > Ni,且儿童及成人 Cr 元素的风险系数多大于 1,而其他 5 种重金属的风险系数均小于 1,表明广州市居民经膳食摄入蔬菜后,重金属 Cr 暴露接触对人体健康可能会造成危害;尽管 Cd 的 HQ 值未超出 1,但其值达 0.566,说明当地居民经饮食摄入的 Cd 对人体具有潜在的健康风险. 此外,还发现除 Zn 元素的 HQ<sub>成人</sub> > HQ<sub>儿童</sub> 外,其他元素的 HQ<sub>成人</sub> 均 < HQ<sub>儿童</sub>,可见需加强对儿童蔬菜重金属膳食摄入的健康风险方面的关注. 8 种蔬菜中重金属的危害指数(HI)呈现与 EDI 值和 HQ 值类似的趋势(图 6),即不同种蔬菜重金属对儿童的危害指数均高于成人.

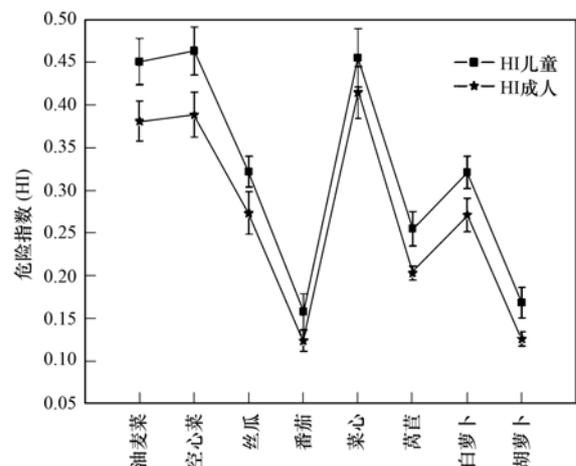


图 6 8 种蔬菜重金属的危险指数(HI)

Fig. 6 Hazard index of heavy metals in 8 kinds of vegetables

### 3 结论

(1)广州市市售蔬菜市场采集的 116 个蔬菜样品中 Cu 与 Zn 的含量均远低于食品卫生标准限值, 重金属 Cr(超标率高达 91.67%)、Pb(超标率高达 35.71%) 为所有检测蔬菜样品中的主要污染物, 蔬菜中 Cd 与 Ni 超标情况相对轻一点。

(2)采集的 8 种蔬菜污染程度具体表现在: 空心菜、油麦菜、菜心、白萝卜和胡萝卜均处于警戒级, 而茼蒿、丝瓜和番茄则属于安全级别, 可见所检测的广州市市售蔬菜样品均处于安全和尚清洁的程度; 4 类蔬菜的重金属综合污染程度呈现叶菜类 > 肉质根类 > 茎类菜 > 茄果类的趋势, 表明叶类蔬菜的重金属污染问题需重点关注, 建议相关部门加大对蔬菜重金属污染问题的监管力度。

(3)健康风险评估表明, 广州市居民中日常多食用空心菜、菜心和油麦菜的人群重金属累积的健康风险较高, 且经膳食摄入重金属 Cr 对人体健康可能会造成危害, Cd 对人体具有潜在的健康风险。经口摄入蔬菜重金属对儿童可能造成的暴露风险要高于成年人。因此, 需进一步研究广州市蔬菜中 Cr 与 Cd 的污染来源并进行有效防治, 同时居民也应减少空心菜、菜心及油麦菜这 3 种蔬菜的摄入, 保障其饮食安全以降低健康风险。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1638-1642.
- Qin W S, Zou X J, Qiu R L. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou, China via consumption of vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1638-1642.
- [ 2 ] 赵凯, 文典, 王其枫, 等. 广州市郊蔬菜重金属污染研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(11): 178-180.
- Zhao K, Wen D, Wang Q F, et al. Investigation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou suburban[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(11): 178-180.
- [ 3 ] 谭铭雄, 马林, 林国桢, 等. 广州市 1996~2002 年蔬菜污染监测与分析[J]. 中国热带医学, 2005, 5(2): 348-351.
- Tan M X, Ma L, Lin G Z, et al. Analysis of monitoring results of vegetable pollution from 1996 to 2002 in Guangzhou City[J]. China Tropical Medicine, 2005, 5(2): 348-351.
- [ 4 ] 秦文淑. 广州城区居民食用蔬菜重金属含量现状分析[J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2010, 9(4): 17-21.
- Qin W S. Actuality analysis of heavy metals content in main vegetable species of Guangzhou[J]. Journal of Guangdong Industry Technical College, 2010, 9(4): 17-21.
- [ 5 ] 王晓波, 陈海珍, 刘冬英, 等. 广州市蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(5): 549-551.
- Wang X B, Chen H Z, Liu D Y, et al. Contents of heavy metal in vegetables and their potential risks to human health in Guangzhou city[J]. Chinese Journal of Public Health, 2011, 27(5): 549-551.
- [ 6 ] 何江华, 柳勇, 王少毅, 等. 广州市菜园土主要蔬菜重金属背景含量的研究[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 269-272.
- He J H, Liu Y, Wang S Y, et al. Studies on the background levels of heavy metals in major vegetables in Guangzhou vegetable garden soils[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 269-272.
- [ 7 ] 刘钰钗, 陈婷, 周金森, 等. 广州市黄埔区蔬菜重金属污染调查研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(6): 1085-1087.
- Liu Y C, Chen T, Zhou J S, et al. Investigation on heavy metal pollution condition in vegetables from Huangpu District in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2007, 17(6): 1085-1087.
- [ 8 ] 黄国锋, 吴启堂, 容天雨, 等. 无公害蔬菜生产基地环境质量评价[J]. 环境科学研究, 1999, 12(4): 53-56.
- Huang G F, Wu Q T, Rong T Y, et al. Environmental quality assessment of the harmless vegetable production area [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(4): 53-56.
- [ 9 ] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 130-135.
- Cui X F, Li S Y, Ding X D, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 130-135.
- [ 10 ] NY/T 398-2000 农、畜、水产品污染监测技术规范[S]. NY/T 398-2000 Procedural regulations regarding monitoring of pollutants in the produces of agriculture, animal husbandry and fishery[S].
- [ 11 ] Xu D C, Zhou P, Zhan J, et al. Assessment of trace metal bioavailability in garden soils and health risks via consumption of vegetables in the vicinity of Tongling mining area, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 90: 103-111.
- [ 12 ] US Environmental Protection Agency (USEPA). Integrated Risk Information System (IRIS)[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/index.html>, 2012.
- [ 13 ] Abbasi A M, Iqbal J, Khan M A, et al. Health risk assessment and multivariate apportionment of trace metals in wild leafy vegetables from Lesser Himalayas, Pakistan[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 92: 237-244.
- [ 14 ] 胡勤海, 叶兆杰. 蔬菜主要污染问题[J]. 农村生态环境(学报), 1995, 11(3): 52-56.
- Hu Q H, Ye Z J. Main problems of pollution in vegetables[J]. Rural Eco-Environment, 1995, 11(3): 52-56.
- [ 15 ] 张伯尧. 兰州市菜地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评估[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- Zhang B Y. A survey of heavy metal concentrations in vegetables and soils in Lanzhou and the potential risks to human health[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.
- [ 16 ] 胡霓红, 文典, 王富华, 等. 珠三角主要工业区周边蔬菜产地土壤重金属污染调查分析[J]. 热带农业科学, 2012, 32(4): 67-71.

- Hu N H, Wen D, Wang F H, *et al.* Investigation and analysis of heavy metals in vegetable producing soils around main industrial areas in the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2012, **32**(4): 67-71.
- [17] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(4): 52-56.
- Li F L, Liu C Q, Yang Y G, *et al.* Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and Capsicum (*Capsicum frutescens* L. var. *longum* Bailey) system in Guiyang, Southwest China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(4): 52-56.
- [18] Ministry of Environmental Protection the People's Republic of China. Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[EB/OL]. Beijing, China. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200910/W020091009550671751947.pdf>. 2014.
- [19] 王晓慧. 上海市蔬菜重金属污染效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- Wang X H. Pollution effect of heavy metals in vegetable in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [20] Yang Q W, Xu Y, Liu S J, *et al.* Concentration and potential health risk of heavy metals in market vegetables in Chongqing, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(6): 1664-1669.
- [21] Zurera-Cosano G, Moreno-Rojas R, Salmeron-Egea J, *et al.* Heavy metal uptake from greenhouse border soils for edible vegetables[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, **49**(3): 307-314.
- [22] 陈跃山. 水稻硅素营养缺乏的症状及对策[J]. *种子世界*, 2004, (9): 36.
- [23] 王小骊, 张永志, 王钢军, 等. 蔬菜中有害重金属元素污染研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2004, **16**(5): 259-262.
- Wang X L, Zhang Y Z, Wang G J, *et al.* Advance of study on harmful heavy metal pollution on vegetables [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, **16**(5): 259-262.
- [24] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 210-244.
- [25] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海浦东部分蔬菜重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 761-765.
- Yao C X, Chen Z L, Zhang J, *et al.* Heavy metal pollution assessment of vegetables in Pudong zone of Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(4): 761-765.
- [26] 杜景东, 高凡, 王敬贤, 等. 京郊蔬菜重金属含量特征及安全评价[J]. *北京农学院学报*, 2014, **29**(3): 42-46.
- Du J D, Gao F, Wang J X, *et al.* Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in vegetables of Beijing suburban[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, **29**(3): 42-46.
- [27] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [28] 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.
- [29] 杨国义, 罗薇, 高家俊, 等. 广东省典型区域蔬菜重金属含量特征与污染评价[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(1): 133-136.
- Yang G Y, Luo W, Gao J J, *et al.* Heavy metal contents and pollution evaluation in vegetables in Guangdong province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(1): 133-136.
- [30] 谢正苗, 李静, 王碧玲, 等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 2110-2116.
- Xie Z M, Li J, Wang B L, *et al.* Evaluation on environmental quality of heavy metals in soils and vegetables based on geostatistics and GIS [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(10): 2110-2116.
- [31] 黄玉源, 黄益宗, 李秋霞, 等. 广州市污水灌溉对菜地土壤和蔬菜的影响[J]. *环境化学*, 2005, **24**(6): 731-732.
- [32] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **109**(3-4): 310-322.
- [33] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **383**(1-3): 81-89.

## CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> ( 1 )
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event .....	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> ( 13 )
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on GAM Model .....	HE Xiang, LIN Zhen-shan ( 22 )
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume .....	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> ( 33 )
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer .....	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> ( 41 )
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary .....	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> ( 52 )
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO <sub>2</sub> and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China .....	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> ( 60 )
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake .....	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> ( 70 )
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake .....	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> ( 78 )
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil .....	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song ( 87 )
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake .....	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> ( 95 )
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou .....	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> ( 104 )
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression .....	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> ( 113 )
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir .....	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying ( 121 )
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir .....	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> ( 129 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area .....	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> ( 138 )
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed .....	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> ( 147 )
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes .....	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> ( 156 )
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake .....	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> ( 162 )
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake .....	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> ( 170 )
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface .....	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> ( 180 )
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms .....	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> ( 188 )
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment .....	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> ( 195 )
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater .....	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> ( 201 )
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique .....	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> ( 212 )
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent .....	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> ( 220 )
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe <sup>2+</sup> )-Ozonation Process .....	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 229 )
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors .....	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> ( 238 )
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration .....	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 247 )
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis .....	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> ( 253 )
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification .....	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> ( 260 )
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules .....	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> ( 269 )
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization .....	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> ( 276 )
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis .....	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> ( 283 )
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin ( 294 )
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain .....	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> ( 301 )
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing .....	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> ( 309 )
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi .....	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> ( 318 )
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China .....	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> ( 327 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 333 )
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice .....	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> ( 343 )
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress .....	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> ( 352 )
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition .....	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> ( 361 )
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring .....	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> ( 368 )
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation .....	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> ( 374 )
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> ( 382 )
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou .....	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> ( 389 )
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors .....	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> ( 399 )
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants .....	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 405 )
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> ( 412 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172