中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究

赵慧，何博，孟晶，周云桥，史斌，王铁宇

引用本文:
赵慧, 何博, 孟晶, 等. 典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1892–1902.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190199

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北地区有机种植和常规种植模式下土壤重金属含量及污染评价

Assessment of heavy metal content and pollution in organic and conventional farming soils in North China

中国生态农业学报. 2015(7): 877–885 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141436

河北板蓝根产地土壤–植物中镉铅汞砷含量 特征及其污染评价

Assessment of Cd, Pb, Hg and As contamination in soils and plants in Isatis indigotica cultivated regions in Hebei Province

中国生态农业学报. 2017, 25(10): 1535–1544 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170379

沿海滩涂区土壤重金属含量分布及其有效态影响因素

Content and bioavailability factors of soil heavy metals in mudflat coastal areas

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 287–298 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160407

科技部“十三五”农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发重点专项“长江下游农业面源和重金属污染防控技术示范”项目正式启动

中国生态农业学报. 2016, 24(11): 1583–1584 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160896

河北典型农田大气重金属干沉降通量及来源解析

Dry deposition flux of atmospheric heavy metals and its source apportionment in a typical farmland of Hebei Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1245–1254 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190092

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 12 月 第 27 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2019, 27(12): 1892−1902

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190199

赵慧, 何博, 孟晶, 周云桥, 史斌, 王铁宇. 典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1892−1902

ZHAO H, HE B, MENG J , ZHOU Y Q, SHI B, WANG T Y. Accumulation characteristics and health risks of heavy metals in vegetables in typical urbanized areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1892−1902

典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究*

赵 慧[1,2], 何 博[1,2], 孟 晶[1], 周云桥[1,2], 史 斌[1], 王铁宇[1,2**]

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 工业化和城市化带来的重金属污染对环境质量、食品安全、人体健康及社会经济可持续发展构成严重威胁和挑战。为了掌握典型城市化区域蔬菜生产的重金属污染特征与食用健康风险, 从而为快速城市化区域的农业实践提供依据, 本研究选取珠三角电镀、染织等工业密集典型城市化区域的蔬菜和土壤为研究对象, 通过采集蔬菜和表层土壤样品, 使用单因子污染评价和内梅罗综合污染指数法对蔬菜样品中 Cd、Ni、Cr、As、Pb 5 种重金属进行污染评价, 使用目标危害商数法进行健康风险评价。研究发现, 该地区菜地土壤存在 Cd 污染。研究区蔬菜中重金属的富集吸收能力为 Cd>Ni>Cr>As>Pb, 叶菜类对 Cd 的富集最多, 豆角类对 Ni 的富集较多。单因子污染评价结果显示蔬菜中重金属超标率按大小排序为 Ni>Cr>Cd>Pb=As, Ni、Cr 和 Cd 超标率分别为 10.53%、2.63%和 1.32%, Pb 和 As 均未超标; 综合污染指数的评价显示叶菜类样品处于轻度污染水平, 豆角类处于中度污染水平, 瓜类尚未受到重金属污染。健康风险评价结果表明, 叶菜类和豆角类的综合目标危害商数(TTHQ)均大于 1, 长期食用叶菜类和豆角类会对健康造成影响, 成人和儿童的综合目标危害商数排序均为叶菜类>豆角类>瓜类, 儿童摄食蔬菜的重金属健康风险高于成人。总体来说, 研究区蔬菜重金属健康风险基本处于可接受范围, 但叶菜类 Cd 和豆角类 Ni 造成的健康风险需引起重视。

关键词: 典型城市化区; 蔬菜; 重金属; 累积特征; 污染评价; 健康风险

中图分类号: X82

文章编号: 2096-6237(2019)12-1892-11 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Accumulation characteristics and health risks of heavy metals in vegetables in typical urbanized areas*

ZHAO Hui[1,2], HE Bo[1,2], MENG Jing[1], ZHOU Yunqiao[1,2], SHI Bin[1], WANG Tieyu[1,2**]

(1. State Key Laboratory of Urban and Regionl Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Heavy metal pollution-related problems due to industrialization and urbanization are of great concern, and they pose severe threats and challenges to environmental quality, food safety, human health, and sustainable socioeconomic development. This study examined vegetables and soils in areas with intensive electroplating and dyeing industries. Vegetable and soil sam-

* 国家重点研发计划项目(2018YFC1800301)和国家自然科学基金项目(41877509)资助

** 通信作者: 王铁宇, 主要研究方向为污染生态效应与修复。E-mail: wangty@rcees.ac.cn

赵慧, 研究方向为污染生态效应与修复。E-mail: huizhao2016_st@rcees.ac.cn

收稿日期: 2019-03-18 接受日期: 2019-07-09

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFC1800301) and the National Natural Science Foundation of China (41877509).

** Corresponding author, E-mail: wangty@rcees.ac.cn

Received Mar. 18, 2019; accepted Jul. 9, 2019

ples were collected, and single-factor pollution assessment and the Nemero comprehensive pollution index were used to evaluate the pollution levels of five heavy metals, i.e., Cd, Ni, Cr, As, and Pb, in vegetable samples. Further, the target hazard quotient method was used to assess health risk. Pollution by Cd was found in the vegetable soil in the study area. Enrichment and absorptive capacity of heavy metals in vegetable samples in the study area were in this order: Cd > Ni > Cr > As > Pb. Leafy vegetables had the highest Cd enrichment, whereas beans had the highest Ni enrichment. Single-factor pollution assessment revealed that the over-standard rate of heavy metals in the vegetable samples was in this order: Ni > Cr > Cd > Pb = As; moreover, the over-standard rates of Ni, Cr, and Cd were 10.53%, 2.63%, and 1.32%, respectively, and the content of Pb and As in the vegetable samples did not exceed the standard content. Nemero evaluation of the samples revealed that leafy vegetables had a mild level of pollution, beans had a moderate level of pollution, and melons were not contaminated by heavy metals. Health risk assessment revealed that the comprehensive target hazard quotient (TTHQ) of leafy vegetables and beans was >1 and that the long-term consumption of leafy vegetables and beans in the study area would adversely affect health. The TTHQ for adults and children was as follows: leafy vegetables > beans > melons. The health risks posed by the intake of heavy metals in food were higher for children than for adults. In general, the health risks posed by heavy metals in vegetables in the study area were within the acceptable range, but the health risks posed by Cd in leafy vegetables and Ni in beans need serious consideration.

Keywords: Typical urbanized area; Vegetables; Heavy metals; Residual characteristics; Pollution assessment; Health risk

蔬菜是人们日常生活中必不可少的副食品，是人体摄入维生素、矿物质、膳食纤维等营养成分的主要来源，也是极易受重金属污染和影响的农作物[1-4]。近年来受到城市化、工业化的影响，土壤重金属污染已达到相当严重的程度[5]，并随着生物迁移在蔬菜等植物体内积累[6-8]。食物链污染是人类接触重金属的主要途径，对于重金属在蔬菜中的积累以及对人体健康造成的危害，各国学者都有广泛的研究。巴西科学家发现摄入含有重金属的蔬菜是这些元素进入人体的主要方式之一，一旦进入，重金属沉积在骨骼和脂肪组织中，可引起一系列疾病[9]；希腊科学家认为工业、农业和家庭活动造成重金属对生物圈的影响，给农业土壤的安全合理利用带来了严重的问题，生长在受污染环境中的植物会在高浓度下累积重金属，食用植物性食品会对人体健康造成严重威胁[10]；澳大利亚研究者发现冶炼厂附近种植蔬菜的危险增加[11]。厦门、宁波、重庆[12]、珠三角等多地进行的蔬菜重金属含量监测表明蔬菜中重金属污染程度较高[13]，已有学者报道蔬菜对某些重金属存在显著的吸收富集作用[14]。因此，关于农产品污染尤其是因重金属污染而影响人体健康阻碍生态农业发展的研究日益引起关注和重视[15-16]，如何利用土壤发展生态农业，降低重金属污染对人体健康造成的风险，需要对重金属污染区域的农作物进行进一步的实证研究。

研究区是我国重要的加工制造和出口基地，改革开放以来快速城市化让此地区积累了严重的重金属污染问题，该区域大量化工、印染、电镀、造纸等工业企业在历史上工业“废水、废气、废渣”的大量排放，农业上复合肥和畜禽粪便的大量使用，冲积型地质成因中上游水道对其重金属的大量输送，都使得研究区耕地土壤中重金属存在明显的积聚趋势。据2017年统计数据，该研究区蔬菜种植2.22万hm^2，蔬菜产量50.51万t，近年来研究区积极推进“放心菜”“菜篮子工程”等建设，对研究区各单元蔬菜中重金属的污染特征进行分析和研究，对于控制蔬菜质量，确保市民生命安全，实现研究区农业的可持续发展具有十分重要的意义。本文选择此典型区域，通过采集叶类、豆角类和瓜类3大类蔬菜，研究区域蔬菜重金属污染的暴露特征以及经口摄取蔬菜的健康风险，以期掌握快速城市化区域蔬菜生产的重金属污染特征与食用健康风险，这对提高研究区蔬菜质量、保障人们的食品安全及促进以人为本、绿色农业可持续生产有重要意义，为快速城市化区域的农业实践提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于亚热带季风性气候的珠三角地区(22°11′~23°20′N，113°09′~113°48′E)，年平均气温高于 20 ℃，属丰水地区，以冲积平原为主，低山丘陵台地错落其间的水乡地形地貌，种植的粮食作物以水稻(*Oryza sativa*)为主，经济作物以蔬菜、水果、花卉苗木为主。当地涉及重金属企业的历史排放，复合肥的大量使用以及地质形成过程均不同程度影响研究区的重金属累积，耕地土壤中重金属存在明显的积聚趋势。

1.2　样品采集与检测

本研究的点位布设遵循“空间均匀”和“局部加

密”的原则，样本由从群体中随机产生的个体组成。点位布设用棋盘式布点法并根据所调查的北部重点污染区域加密布点，在采样过程中根据实际菜地位置做出调整，确保采样位置和样品具有代表性。2018 年 5 月在研究区露地蔬菜种植区随机采集 3 大类 18 个品种的蔬菜样品共 76 个，每个点位保证采齐 3 大类蔬菜，主要采集可食性部分，采集后装入干净自封袋，整个采集过程没有与金属工具接触。采集蔬菜时，对蔬菜种植情况和周围环境作详细记录，并在 15 个蔬菜点位分别采集 0~20 cm 表层土壤样品，本研究采样点蔬菜种类与采样点分布见图 1、表 1。

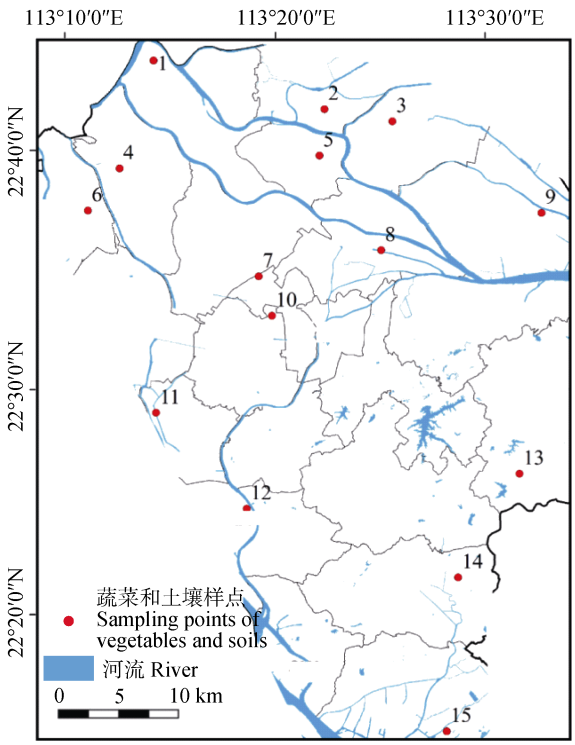

图 1 蔬菜和土壤采样点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of vegetable and soil sampling points distribution

将所采集蔬菜样品先以自来水冲洗干净去除表面杂质，用超纯水冲洗 3 次后用滤纸吸干表面多余水分，切成小块放入烘箱 105 ℃杀青 45 min，60 ℃烘干[17]，最后用玛瑙球磨机将烘干的蔬菜样品研磨成粉末，装入干净塑料自封袋待测，检测的目标重金属为 Pb、Cd、Cr、As、Ni、Cu、Zn、Hg。

检测时，称取蔬菜样品 0.5 g，加硝酸、高氯酸混合酸(2∶1)在 150 ℃电热板上消煮至冒黑烟，且体积小于 3 mL，再次加 4 mL 硝酸，继续加热至近干，最后加 2 mL 盐酸加盖加热至结晶状，室温下冷却后利用 0.5%硝酸定容，通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。样品中 Hg 含量的测定参照 USEPA 7473 采用冷原子吸收测汞仪(DMA-80)测定，分析过程以国家生物成分分析标准物质 GBW 10048(GSB-26 芹菜)进行分析质量控制，质控和样品回收率均为 75%~120%，结果符合质量控制国家标准。

土壤样品放置于风干盘中，摊成 2~3 cm 的薄层自然风干。在磨样室将风干的样品倒在研钵内压碎，拣出杂质，混匀，并用四分法取压碎样，过 2 mm 尼龙筛。过筛后样品全部置无色聚乙烯薄膜上，并充分搅拌混匀，再采用四分法取其两份，一份交样品库存放，另一份样品用于细磨。用于细磨的样品，用球磨仪磨后全部过孔径 0.15 mm(100 目)筛，混匀后备用。研磨混匀后的样品装于塑封无色聚乙烯塑料袋内，并做好土壤标签。

土壤样品中 Pb、Cd、Cr、As、Ni、Cu、Zn 含量的测定中参照国家标准(HJ803—2016)王水提取-电感耦合等离子体质谱法对土壤进行前处理，通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。土壤样品中 Hg 含量的测定参照 USEPA 7473 采用冷原子吸收测汞仪(DMA-80)测定。土壤样品 5 个编一组，选取 2 个平行样，2 个全程序空白样品和 2 个平行质控样，

表 1 采集蔬菜品种与样本数

Table 1 Type and number of the vegetable samples

类型 Type	样本数 Sample size	品种和样本数 Varieties and sample size
瓜类 Melon-vegetable	31	黄瓜 11 个、丝瓜 8 个、冬瓜 5 个、苦瓜 4 个、蒲瓜 2 个、南瓜 1 个 *Cucumis sativus* L. 11; *Luffa cylindrica* (L.) Roem. 8; *Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn. 5; *Momordica charantia* L. 4; *Lagenaria sciceraria* var. *hispida* (Thunb.) Hara 2; *Cucurbita moschata* (Duch.) ex Lam. 1
豆角类 Beans	17	短豆角 6 个、长豆角 11 个 *Phaseolus vulgaris* L. 6; *Vigna unguiculata* (L.) Walp. 11
叶菜类 Leaf-vegetable	28	生菜 1 个、蕹菜 5 个、红薯叶 3 个、油麦菜 7 个、菁芰菜 1 个、甜菜 1 个、菜心 4 个、苋菜 4 个、油菜 1 个、木耳菜 1 个 *Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort. 1; *Ipomoea aquatica* Forsk 5; *Ipomoea batatas* (L.) Lam 3; *Lactuca sativa* var *longifoliaf*. Lam 7; *Beta vulgaris* L. 1; *Beta vulgaris* L. 1; *Brassica campestris* L. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee 4; *Amaranthus tricolor* L. 4; *Brassica napus* L. 1; *Gynura cusimbua* 1

双平行样测定结果的误差均在土壤环境监测技术规范(HJ/T166—2004)允许误差范围内, 空白样品与土壤样品采用相同的预处理方法进行制备与测定, 保证每组样品 2 个空白样, 其测定结果均低于测定下限。质控样品回收率均处于 70%~125%, 检测过程中所使用的内标物质 Ge 的响应值介于 70%~130%满足要求。检测全过程保证每 5 个样品回测标准曲线中间浓度, 满足测定结果浓度在标准浓度的 90%~110%范围内。

1.3　重金属污染评价标准与方法

1.3.1　蔬菜重金属评价限量标准

本研究蔬菜中 Cr、As、Cd、Pb 的临界值以 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的相关限量标准作为参照, Ni 的临界值以 USEPA 规定的 Ni 摄入参考剂量(*RfD*)为 0.02 $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 为参考, 成人体重以 60 kg 估算, 假设人群 Ni 的摄入都来源于蔬菜, 推算 Ni 超标临界值为 0.75 $mg \cdot kg^{-1}$ 作为 Ni 评价标准。另外, 研究区蔬菜样品 Hg 未检出, 卫生部和国家标准化管理委员会于 2011 年废止 GB13106—1991《食品中锌限量卫生标准》、GB15199—1994《食品中铜限量卫生标准》, 不再将 Cu、Zn 作为污染物指标, 因此本研究仅对 Cr、Ni、As、Cd、Pb 5 种重金属进行分析。

1.3.2　单项污染指数法

单项污染指数是一种评价污染程度的无量纲指数, 可以反映超标倍数和污染程度, 本研究采用单项污染指数法对蔬菜重金属污染状况进行评价。计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为单项污染指数, C_i 为蔬菜中重金属实测浓度($mg \cdot kg^{-1}$), S_i 为蔬菜中重金属含量的评价标准值或参考值($mg \cdot kg^{-1}$)。$P_i \leqslant 1$, 表示无污染; $1<P_i \leqslant 2$, 表示轻度污染; $2<P_i \leqslant 3$, 表示中度污染; $3<P_i$, 表示重度污染, 且 P_i 越大受到污染越严重。

1.3.3　内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是一种评价综合污染水平的方法, 本研究采用该方法评价采样点蔬菜样品重金属综合污染水平。计算公式如下:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\mathrm{ave}}^2}{2}} \tag{2}$$

$$P_i = C_i / S_i \tag{3}$$

式中: $P_{综}$ 为内梅罗综合指数; $P_{i\mathrm{ave}}$ 为蔬菜单因子污染指数的平均值; $P_{i\max}$ 为蔬菜单因子污染指数的最大值; P_i 为蔬菜中重金属污染物 i 单因子污染指数, 该指数反映某一重金属污染物超标倍数; C_i 为蔬菜中重金属污染物 i 含量($mg \cdot kg^{-1}$); S_i 为重金属污染物 i 的评价标准。陈志良等[18]根据《绿色食品产地环境质量状况评价纲要(试行)》(1994 年)中土壤污染等级划分标准制定蔬菜质量分级标准, 见表 2。

表 2　蔬菜质量分级标准

Table 2　Grading standard of vegetables quality

等级划分 Gradation	$P_{综}$	污染等级 Gradation	污染水平 Pollution level
1	$P_{综} \leqslant 0.7$	安全 Safe level	清洁 Clean
2	$0.7<P_{综} \leqslant 1$	警戒级 Alert level	尚清洁 Clean yet
3	$1<P_{综} \leqslant 2$	轻度污染 Mild pollution	蔬菜开始受到污染 Vegetables are beginning to be contaminated
4	$2<P_{综} \leqslant 3$	中度污染 Moderate pollution	蔬菜受中度污染 Vegetables are moderately contaminated
5	$P_{综}>3$	重度污染 Heavy pollution	蔬菜受污染已相当严重 Vegetables have been seriously polluted

1.4　健康风险评价方法与指标

由于蔬菜中 Cd、Pb、Hg、As、Ni 5 种重金属主要通过摄食在人体中积累, 产生慢性的致癌或非致癌风险, 本研究为了解研究区居民通过食用蔬菜而带来的健康风险, 采用危害商法对该研究区 3 大类蔬菜作物的健康风险进行评价, 分别评估针对儿童和成人摄入蔬菜[19]的健康风险。单一重金属的目标危害商数(THQ)和综合目标危害商数(TTHQ)的计算公式[2-3]分别如下:

$$\mathrm{THQ}_i = \frac{\mathrm{EF}_R \times \mathrm{ED} \times F_{IR} \times C_i \times 10^{-3}}{R_f D \times \mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \tag{4}$$

$$\mathrm{TTHQ} = \sum_{i=1}^{5} \mathrm{THQ}_i \tag{5}$$

式中各指标物理意义及参考值如表 3 所示。

2　结果与分析

2.1　蔬菜重金属累积水平

研究区 3 大类蔬菜中 Cr、Pb、Ni、As、Cd 5 种重金属的累积水平和食品中 5 种重金属限量标准[20]

见表 3。总体而言，研究区蔬菜重金属含量相对较低，Cr 的累积量中值和均值按照大小排序均为豆角类>叶菜类>瓜类，但均未超过限量标准。Pb 的累积量中值和均值按照大小排序均为豆角类=叶菜类>瓜类，只有瓜类未超过限量标准。Ni 的累积量中值和均值大小排序均为豆角类>叶菜类>瓜类，豆角类中 Ni 的累积量中值和均值都高于 1994 年全国食品卫生标准分委会评审通过的内控标准 0.3 mg·kg^{-1}，均值高于根据 R_fD 推算的 0.75 mg·kg^{-1}，叶菜类和瓜类未超过限量标准，豆角类中 Ni 的风险值得进一步关注。As 的累积量中值和均值按照大小排序均为叶菜类>豆角类>瓜类，3 类蔬菜均未超过限量标准。Cd 的累积量中值和均值按照大小排序为叶菜类>瓜类=豆角类，均未超过限量标准。由表 4 可知，蔬菜中 Ni、Cr 浓度值相对最高，Cd、As、Pb 浓度值相对较少，叶菜类 As、Cd 浓度高于另外两类蔬菜，豆角类中 Ni 浓度高于另外两类蔬菜。陈同斌等[4]对北京地区的蔬菜研究也证明云架豆类 Ni 富集系数较高，且裸露地蔬菜中 Ni 含量显著高于设施蔬菜。可见，不同种类蔬菜对重金属的富集有明显差异，且本研究蔬菜样品均采自裸露地，是造成各类蔬菜中 Ni 累积量较高的重要因素。

表 3 人体健康风险模型参数取值[21]

Table 3 Parameters of human health risk assessment model[21]

评价参数 Evaluation parameter	物理意义 Physical significance	参考值 Reference value	
		成人 Adult	儿童 Child
BW	体重 Weight (kg)	56.8	15.9
ED	蔬菜暴露年限 Exposure time of vegetable (a)	70	70
EF_R	蔬菜暴露频率 Exposure frequency of vegetable (d·a^{-1})	365	365
F_{IR}	日蔬菜摄入量 Daily vegetable intake (g·d^{-1})	300	200
AT	蔬菜平均作用时间 Average action time of vegetable (d)	ED×365	ED×365
C_i	蔬菜中重金属浓度 Heavy metal concentration in vegetable (mg·kg^{-1})	—	
R_fD [mg·(kg·d)$^{-1}$]	Ni	0.02	
	Cd	0.001	
	As	0.000 3	
	Pb	0.003 5	
	Cr	0.003	

表 4 研究区蔬菜中重金属的累积量统计

Table 4 Statistics of heavy metal residues in vegetables in the study area mg·kg^{-1}

重金属 Heavy metal	叶菜类 Leaf-vegetable				瓜类 Melon-vegetable				豆角类 Beans			
	范围 Range	中值 Mid-value	均值 Mean-value	标准 Criterion	范围 Range	中值 Mid-value	均值 Mean-value	标准 Criterion	范围 Range	中值 Mid-value	均值 Mean-value	标准 Criterion
Cr	0.06~0.33	0.17	0.17	0.50	0.03~0.21	0.05	0.07	0.50	0.06~0.77	0.17	0.25	0.50
Pb	0.01~0.18	0.03	0.04	0.01	0.00~0.02	0.01	0.01	0.01	0.01~0.13	0.03	0.04	0.01
Ni	0.06~0.49	0.15	0.19	0.75	0.04~0.37	0.11	0.13	0.75	0.34~2.52	0.63	1.06	0.75
As	0.00~0.09	0.02	0.02	0.50	0.00~0.01	0.00	0.00	0.50	0.01~0.03	0.01	0.01	0.50
Cd	0.01~0.39	0.05	0.07	0.20	0.01~0.51	0.01	0.01	0.05	0.00~0.05	0.01	0.01	0.10

2.2 土壤重金属含量与蔬菜中重金属富集

根据 15 个点位土壤重金属含量的统计结果发现，5 种重金属的含量除个别点位，基本都超过研究区土壤背景值，研究区土壤的 pH 处于偏酸性水平，Cr、Ni、As、Cd、Pb 含量均值分别为 49.57 mg·kg^{-1}、32.13 mg·kg^{-1}、16.96 mg·kg^{-1}、0.50 mg·kg^{-1}、45.89 mg·kg^{-1}，研究区土壤背景值为 50.50 mg·kg^{-1}、14.40 mg·kg^{-1}、8.90 mg·kg^{-1}、0.06 mg·kg^{-1}、36.00 mg·kg^{-1}。对照 GB15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》[22]中筛选值，Cd 有 13 个点位超标，Pb 有 1 个点位超标，其余重金属均未超过筛选值。土壤中就单个重金属超标情况来看，Cd 的超标最显著，其余重金属在土壤中污染程度较低。

从图 2 中不同采样点蔬菜与土壤中重金属含量可以看出，蔬菜中 5 种重金属总量与土壤中 5 种重金属含量具有相似的规律，蔬菜中 Ni 含量最高，多数点位的豆角类中 Ni 含量显著高于其他两类蔬菜，土壤中 Cd 含量较低，但蔬菜中 Cd 含量显著增多，

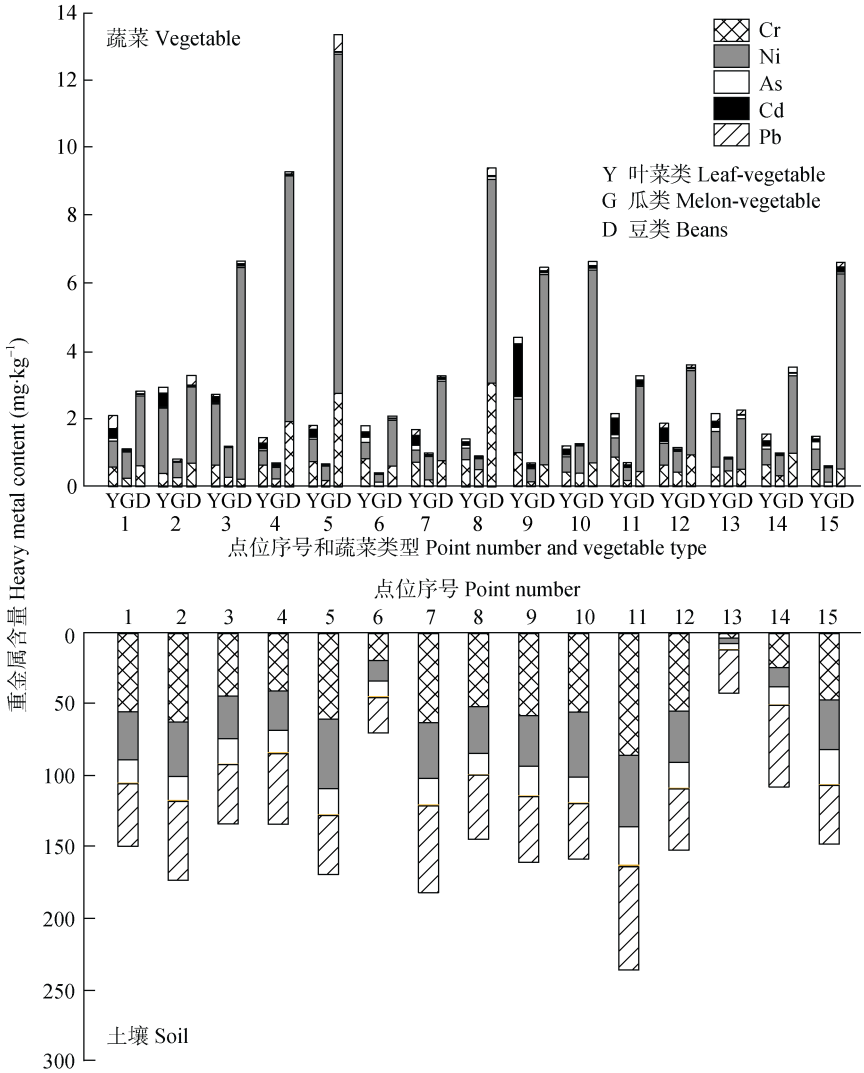

图 2　不同采样点蔬菜与土壤重金属含量水平

Fig. 2　Heavy metals contents in vegetables and soil at different sampling sites

尤其叶菜类 Cd 含量显著高于其他两类蔬菜，因此研究区在种植蔬菜时应考虑 Ni、Cd 等重金属含量状况，避免选择豆角类蔬菜中抗 Ni 能力较差的蔬菜品种，以及叶菜类中抗 Cd 能力较弱的蔬菜品种，这与白玉杰等[23]研究结果一致。

对研究区土壤与蔬菜中各种重金属含量进行相关性分析发现(表 5)，土壤中重金属含量与蔬菜重金属含量间无明显相关性，此结果与前人的研究结果一致[24-26]。但从图 2 中可以看出蔬菜与土壤中 5 种重金属总量具有类似的累积趋势，相关性较弱没有直接的线性关系可能是与重金属在土壤中的赋存形态、蔬菜作物的生物有效性有关，这也解释了土壤中 Cd 含量较低但是蔬菜中，尤其是叶菜类污染程度反而高的现象。因此，今后对于重金属在土壤和农作物之间的相关关系的研究，要考虑土壤的理化性质、不同重金属的化学形态以及生物吸收的有效性等内容[27]。

蔬菜中重金属的富集系数是指蔬菜中重金属含量与土壤中重金属含量的比值，它可以大致反映蔬菜对重金属的吸收能力。富集系数越小说明蔬菜抗土壤中重金属污染的能力越强。图 3 为 3 大类蔬菜中重金属的富集系数。可以看出，土壤与蔬菜重金属含量的相关程度因蔬菜种类和重金属种类有明显差异[28]，在 5 种重金属中蔬菜对重金属的吸收能力为 Cd>Ni>Cr>As>Pb，叶菜类对重金属 Cd 的富集较多[29]，远高于豆角类和瓜类；豆角类对重金属 Ni 的富集现象较多，高于叶菜类和瓜类；其他 3 种重金属的富集系数差异较小，整体为叶菜类>豆角类>瓜类。

2.3　蔬菜中重金属污染评价

就不同重金属对研究区蔬菜重金属评价结果可看出(表 6)：5 种重金属超标率排序为 Ni>Cr>Cd>Pb=As。Cr 单项污染指数最大值为 1.54，达轻度污染水

表 5 土壤与蔬菜中重金属 Pearson 相关性分析

Table 5 Correlation analysis of heavy metals contents in soil and vegetables

蔬菜重金属 Heavy metals in vegetables		土壤重金属 Heavy metals in soil				
		Cr	Ni	As	Cd	Pb
Cr	叶菜类 Leaf-vegetable	0.162	0.052	0.170	0.375	0.142
	瓜类 Melon-vegetable	−0.275	−0.248	−0.503	−0.412	−0.182
	豆角类 Beans	0.087	0.185	−0.094	0.027	−0.028
Ni	叶菜类 Leaf-vegetable	0.043	−0.023	0.000	−0.167	−0.043
	瓜类 Melon-vegetable	0.217	0.248	0.155	−0.144	0.122
	豆角类 Beans	0.235	0.436	0.317	−0.003	−0.110
As	叶菜类 Leaf-vegetable	−0.292	−0.290	0.015	−0.081	−0.156
	瓜类 Melon-vegetable	−0.008	0.068	−0.116	−0.048	−0.025
	豆角类 Beans	−0.474	−0.441	−0.565*	−0.515*	−0.242
Cd	叶菜类 Leaf-vegetable	0.333	0.219	0.316	0.289	0.191
	瓜类 Melon-vegetable	0.521*	0.385	0.554*	0.532*	0.481
	豆角类 Beans	0.468	0.447	0.774*	0.462	0.360
Pb	叶菜类 Leaf-vegetable	−0.192	−0.327	−0.360	−0.057	−0.032
	瓜类 Melon-vegetable	0.533*	0.295	0.260	0.693*	0.697*
	豆角类 Beans	0.188	0.328	0.027	0.013	0.016

* 0.05 水平下相关性显著(双尾显著检验)。* mean significant correlation at the level of 0.05 according to the double-tailed significance test.

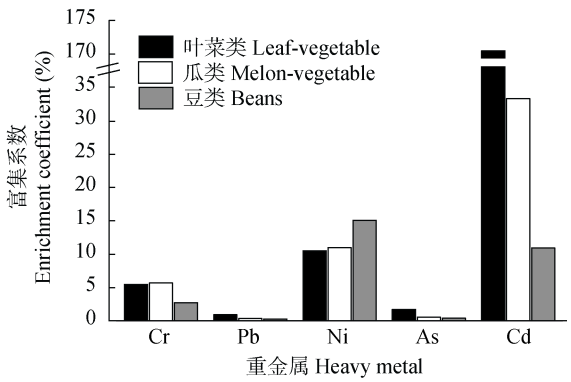

图 3 研究区土壤中重金属向蔬菜的富集系数

Fig. 3 Enrichment coefficients of heavy metals in soil to vegetables in study area

平，Cr 总超标率为 2.63%，可见蔬菜 Cr 污染情况较轻。Ni 单项污染指数最大值为 3.36，有 8 个超标样品，总超标率为 10.53%，其中轻度污染 4 个，中度污染 3 个，重度污染 1 个，相较于其他 4 种重金属，Ni 污染情况较重，变异系数为 1.35，表明 Ni 含量分布具有一定的差异性。Cd 单项污染指数最大值为 1.96，总超标率为 1.32%，变异系数为 1.17，表明重金属 Cd 含量分布具有一定的差异性。As 和 Pb 单项污染指数均小于 1，无超标情况。

就不同类蔬菜样品的单项污染指数评价结果可发现(表 7)，叶菜类中仅 Cd 超标，瓜类无超标情况，豆角类 Ni 和 Cr 有超标现象，超标率 Ni>Cr。从单项污染指数超标率来看，豆角类污染高于叶菜类高于瓜类，Ni 在蔬菜中的超标率最高，其中豆角类污染水平高于叶菜类和瓜类。从内梅罗综合污染指数来看，3 大类蔬菜的综合污染情况为豆角类>叶菜类>瓜类，豆角类的综合污染指数为 2.39，属于中度污染，叶菜类的综合污染指数为 1.39，表明当地蔬菜开始受到重金属污染，尚处于轻度状态，瓜类蔬菜的综合污染指数为 0.36，表明蔬菜安全可食用，尚未受到重金属污染。

另外，对不同点位蔬菜中重金属进行内梅罗综合污染评价(表 8)可知，最大单因子为 Ni、Cd、Cr 在综合污染指数中占比分别为 80%、13%、7%。其中 1 个点位处于中度污染，6 个点位处于轻度污染，其余点位都处于安全状态，未受到重金属污染。综合蔬菜中重金属含量、单因子污染指数以及内梅罗综合污染指数等指标，可得 Ni 和 Cd 为蔬菜中重金属污染的特征污染物，叶菜类和豆角类中均有超标样品需要引起重视。叶菜中 Cd 和豆角类中 Ni 的变异系数较显著，显示出不同地区 Cd 污染空间分布有一定差异。Cd 来源受外界干扰影响较大，可能与当地的电镀[30]工业有关[19,31]。内梅罗综合污染指数法在评价中一定程度上夸大了 Ni 的影响[23,32-33]，使其对环境质量评价的灵敏度不够高，因此下一步需要

表 6　蔬菜重金属单项污染指数(P_i)评价结果统计表

Table 6　Single pollution index (P_i) of heavy metals of vegetables and statistic results

	P_i-Cr	P_i-Ni	P_i-As	P_i-Cd	P_i-Pb
最小值 Minimum value	0.05	0.06	0.00	0.01	0.03
中值 Mid-value	0.22	0.23	0.02	0.17	0.10
最大值 Maximum value	1.54	3.36	0.18	1.96	0.64
均值 Mean value	0.29	0.48	0.03	0.22	0.13
标准偏差 Standard deviation	0.26	0.65	0.03	0.26	0.10
5%分位点 5% score loci	0.06	0.07	0.00	0.03	0.04
第一分位点 First quantile	0.12	0.13	0.01	0.06	0.07
第三分位点 Third quantile	0.37	0.51	0.03	0.27	0.15
变异系数 Coefficient of variation	0.90	1.35	1.02	1.17	0.80
超标率 Exceeding standard rate (%)	2.63	10.53	0.00	1.32	0.00
污染程度占比 Proportion of individual pollution index of different pollution degree (%)					
无污染 Pollution-free (P_i≤1)	97.37	89.47	100.00	98.68	100.00
轻度污染 Mild pollution (1<P_i≤2)	2.63	5.26	0.00	1.32	0.00
中度污染 Moderate pollution (2<P_i≤3)	0.00	3.95	0.00	0.00	0.00
重度污染 Heavy pollution (P_i>3)	0.00	1.32	0.00	0.00	0.00

表 7　不同蔬菜品种重金属污染评价结果统计表

Table 7　Heavy metals contamination of 3 types of vegetables

品种 Type	样本量 Sample size	重金属 Heavy metal	单项污染指数 Single pollution index						综合污染指数 Comprehensive pollution index
			范围 Range	均值 Mean-value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	超标数 Exceeding standard number	超标率 Exceeding standard rate (%)	
叶菜类 Leaf-vegetable	28	Cr	0.12~0.66	0.33	0.15	0.45	0	0.00	1.39
		Ni	0.07~0.65	0.25	0.17	0.66	0	0.00	
		As	0.01~0.18	0.05	0.04	0.76	0	0.00	
		Cd	0.03~1.96	0.35	0.36	1.04	1	3.57	
		Pb	0.03~0.58	0.14	0.10	0.77	0	0.00	
瓜类 Melon-vegetable	31	Cr	0.05~0.42	0.14	0.10	0.71	0	0.00	0.36
		Ni	0.06~0.50	0.18	0.11	0.59	0	0.00	
		As	0.00~0.02	0.01	0.00	0.53	0	0.00	
		Cd	0.01~0.51	0.15	0.13	0.84	0	0.00	
		Pb	0.03~0.21	0.09	0.04	0.49	0	0.00	
豆角类 Beans	17	Cr	0.12~1.54	0.50	0.41	0.82	2	11.76	2.39
		Ni	0.46~3.36	1.41	0.84	0.60	8	47.06	
		As	0.02~0.05	0.03	0.01	0.35	0	0.00	
		Cd	0.04~0.50	0.14	0.13	0.95	0	0.00	
		Pb	0.07~0.64	0.18	0.14	0.76	0	0.00	

表 8　不同采样点位蔬菜重金属综合污染指数

Table 8　Comprehensive pollution index of heavy metals of vegetables at different sampling points

点位序号 Point number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
综合污染指数 Comprehensive pollution index	0.51	0.55	1.49	1.73	2.39	0.41	0.57	1.44	1.42	1.36	0.63	0.61	0.38	0.61	1.41
最大单因子 Maximum single factor	Ni	Ni	Ni	Ni	Ni	Cr	Ni	Ni	Cd	Ni	Cd	Ni	Ni	Ni	Ni

对摄食蔬菜途径所摄取的重金属对人体健康带来的风险进行评价。

2.4　基于蔬菜摄食的健康风险评价

对 3 大类蔬菜中 5 种重金属的健康风险评价结

果(表 9)显示，摄食每类蔬菜对人体带来的健康风险具有显著差异。对单一重金属的目标危害商数(THQ)进行分析，仅儿童摄食豆角类 THQ 大于 1，证明研究区儿童长期食用豆角类蔬菜会对健康造成影响。从综合目标危害商数(TTHQ)的分析可知，叶菜类和豆角类在 TTHQ 中贡献很大，研究区居民食用蔬菜的主要风险主要来源于叶菜类和豆角类。叶菜类 Cd 和 Cr 的健康风险占主导地位，豆角类中 Cr、Ni、As 在综合健康风险中占比较大，豆角类中 Ni 的风险值上升，这与陈同斌等[4]对北京市蔬菜的健康风险评价结果一致，其结果证明云架豆 Ni 富集系数较高，蔬菜 Ni 对北京市部分人群存在一定的健康风险。Cr 在 3 大类蔬菜中的综合健康风险值都较高[31]，这个结果与杜景东等[34]的研究结果一致，蔬菜的复合健康风险主要由 Cr 引起。虽然 As 在污染评价中没有占主导地位，多数蔬菜点位没有超过食品卫生限量标准，但是 As 的生理毒性较大，所以健康风险评价中 As 需要引起重视[35-36]，这与周雅等[2]的研究结果一致，As 容易被细胞吸收导致中毒，长期食用受到 As 污染的蔬菜存在健康风险。

目标危害商数(THQ)和综合目标危害商数(TTHQ)

表 9 蔬菜重金属的目标危害商数(THQ)和综合目标危害商数(TTHQ)

Table 9 Target hazard quotient (THQ) of single heavy metal and TTHQ—Totaltarget hazard quotient (TTHQ) of vegetables

	蔬菜类型 Vegetable type	THQ-Cr	THQ-Pb	THQ-Ni	THQ-As	THQ-Cd	TTHQ
成人 Adult	叶菜类 Leaf-vegetable	0.29	0.06	0.05	0.42	0.37	1.19
	瓜类 Melon-vegetable	0.12	0.01	0.04	0.08	0.04	0.29
	豆角类 Beans	0.44	0.06	0.28	0.26	0.07	1.11
	均值 Mean value	0.28	0.04	0.12	0.25	0.16	0.86
儿童 Children	叶菜类 Leaf-vegetable	0.70	0.15	0.12	0.12	0.88	2.84
	瓜类 Melon-vegetable	0.29	0.03	0.08	0.08	0.09	0.69
	豆角类 Beans	1.05	0.13	0.66	0.66	0.17	2.63
	均值 Mean value	0.68	0.10	0.29	0.29	0.38	2.05

对不同种类蔬菜进行分析可以看出，研究区成人和儿童食用蔬菜的 TTHQ 排序均为叶菜类>豆角类>瓜类，摄食叶菜类和豆角类会对人群的健康造成影响，食用瓜类蔬菜尚未对健康造成威胁。从不同的摄食人群来看，儿童因摄食蔬菜导致的重金属健康风险高于成人[37]，这与王北洪等[38]的研究结果一致，虽然儿童的日蔬菜摄入量低于成人，但是儿童身体各组织器官尚未发育完全，特别是代谢器官的功能性较弱，这是造成儿童因摄食蔬菜导致更高健康风险的重要原因。

3 结论

本研究选取电镀染织等工业密集的城市为研究对象，调查了农用地土壤和蔬菜作物中重金属 Cr、Pb、Ni、As、Cd 的污染状况，进行了污染和健康风险的评价，结果表明:

1)菜地土壤样品重金属含量按照农用地土壤风险筛选值作为评价标准，Cd 的超标最显著，其余重金属在土壤中污染程度较低。

2)叶菜类对 Cd 的富集较多，豆角类对 Ni 的富集较多。单因子污染评价结果显示，Ni 在蔬菜中的超标率最高，豆角类污染水平高于叶菜类和瓜类。从 Nemero 综合污染指数来看，综合污染情况为豆角类>叶菜类>瓜类，豆角类属于中度污染，叶菜类开始受到重金属污染，目前尚处于轻度污染状态，瓜类蔬菜安全可食用，尚未受到重金属污染。健康风险评价结果表明，叶菜类和豆角类的综合目标危害商数(TTHQ)均大于 1，研究区居民长期食用叶菜类和豆角类会对健康造成影响。成人和儿童的综合目标危害商数排序均为叶菜类>豆角类>瓜类，儿童摄食蔬菜的重金属健康风险高于成人。总体来说，研究区蔬菜安全问题值得关注，食用蔬菜对人体具有一定的健康风险。

3)综合土壤和蔬菜的重金属污染状况，确定 Ni 和 Cd 为蔬菜中重金属污染的特征污染物，建议研究区在种植蔬菜时应考虑 Ni、Cd 等重金属含量状况，避免选择豆角类蔬菜中抗 Ni 能力较差的蔬菜品种，以及叶菜类中抗 Cd 能力较弱的蔬菜品种，以优化作物生产和存在重金属污染土壤的利用。同时要严格管控当地农用地的土壤质量，良好的土壤质量不仅可以提高作物产量，还可以保证植物、动物和人类健康，是实现绿色农业的前提。

参考文献 References

[1] CHERFI A, ACHOUR M, CHERFI M, et al. Health risk assessment of heavy metals through consumption of vegetables irrigated with reclaimed urban wastewater in Algeria[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 245–252

[2] 周雅, 毕春娟, 周枭潇, 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] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 672–678
ZHENG N, WANG Q C, ZHENG D M. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(4): 672–678

[4] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 349–361
CHEN T B, SONG B, ZHENG Y M, et al. A survey of nickel concentrations in vegetables and vegetable soils of Beijing and their healthy risk[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 349–361

[5] LIU W H, ZHAO J Z, OUYANG Z Y, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. Environment International, 2005, 31(6): 805–812

[6] 徐笠, 陆安祥, 田晓琴, 等. 典型设施蔬菜基地重金属的累积特征及风险评估[J]. 中国农业科学, 2017, 50(21): 4149–4158
XU L, LU A X, TIAN X Q, et al. Accumulation characteristics and risk assessment of heavy metals in typical greenhouse vegetable bases[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(21): 4149–4158

[7] 张旭红, 李蔓. 北京市售叶菜类蔬菜重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 北京城市学院学报, 2014, (3): 8–13
ZHANG X H, LI M. The health risks assessment and characteristics of heavy metal concentrations of leaf vegetables in Beijing market[J]. Journal of Beijing City University, 2014, (3): 8–13

[8] 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

[9] GUERRA F, TREVIZAM A R, MURAOKA T, et al. Heavy metals in vegetables and potential risk for human health[J]. Scientia Agricola, 2012, 69(1): 54–60

[10] FYTIANOS K, KATSIANIS G, TRIANTAFYLLOU P, et al. Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 67(3): 0423–0430

[11] KACHENKO A G, SINGH B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2006, 169(1/2/3/4): 101–123

[12] 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

[13] LUO C L, LIU C P, WANG Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an E-waste processing site, South China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 481–490

[14] WU S, PENG S Q, ZHANG X X, et al. Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 71–78

[15] 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

[16] 陈怡先, 姜小三, 王勇, 等. 基于 GIS 矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1642–1652
CHEN Y X, JIANG X S, WANG Y, et al. Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(4): 1642–1652

[17] 杨阳, 王美娥, 李艳玲, 等. 基于转移方程的蔬菜镉累积预测和土壤风险阈值推导[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 603–608
YANG Y, WANG M E, LI Y L, et al. Prediction of Cd in vegetables and soil Cd threshold derivation based on transfer function[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 603–608

[18] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 389–398
CHEN Z L, HUANG L, ZHOU C Y, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 389–398

[19] ZHENG N, WANG Q C, ZHANG X W, et al. Population health risk due to dietary intake of heavy metals in the industrial area of Huludao City, China[J]. Science of the Total Environment, 2007, 387(1/2/3): 96–104

[20] 国家生态环境部. GB 2762—2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 2762—2017 National Food Safety Standard Contaminant Limit in Food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017

[21] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要(儿童卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016
DUAN X L. Exposure Factors Handbook of Chinese Population (Children)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016

[22] 国家生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地

土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Development Land[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018

[23] 白玉杰, 沈根祥, 陈小华, 等. 三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1619–1625
BAI Y J, SHEN G X, CHEN X H, et al. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1619–1625

[24] LIU X M, SONG Q J, TANG Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil–vegetable system: A multi-medium analysis[J]. Science of the Total Environment, 2013, 463/464: 530–540

[25] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4360–4369
CHEN F, DONG Z Q, WANG C C, et al. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4360–4369

[26] 姬艳芳, 李永华, 孙宏飞, 等. 凤凰铅锌矿区土壤-水稻系统中重金属的行为特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2143–2150
JI Y F, LI Y H, SUN H F, et al. Translocation and accumulation of heavy metals in soil-paddy system at Fenghuang lead-zinc deposit area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2143–2150

[27] YANG Y, ZHANG F S, LI H F, et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1117–1122

[28] ZHOU H, YANG W T, ZHOU X, et al. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(3): 289

[29] CHANG C Y, YU H Y, CHEN J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(3): 1547–1560

[30] 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(1/2/3): 81–89

[31] LIU J, ZHANG X H, TRAN H, et al. Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18(9): 1623–1632

[32] 罗丹, 胡欣欣, 郑海锋, 等. 镍对蔬菜毒害临界值的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 584–589
LUO D, HU X X, ZHENG H F, et al. Study on the threshold values of Ni toxicity to vegetables[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(3): 584–589

[33] 聂晓玲, 王敏娟, 刘宇, 等. 陕西省市售蔬菜中镍含量调查及其健康风险评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, 26(8): 1065–1068
NIE X L, WANG M J, LIU Y, et al. Surveillance on the contents of nickel in commercial vegetables and health risk evaluation in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2016, 26(8): 1065–1068

[34] 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

[35] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 阿吉古丽·马木提, 等. 新疆焉耆盆地农田土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(2): 171–181
MAMATTURSUN E, ANWAR M, AJIGULl M, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of farmland soils of Yanqi basin in Xinjiang Province[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2): 171–181

[36] 廖文, 吴烨, 汪光, 等. 广州市居民食品砷摄入的健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(5): 272–280
LIAO W, WU Y, WANG G, et al. Human health risk assessment on residents' arsenic ingestion through food in Guangzhou City[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(5): 272–280

[37] LIU L, ZHANG X Y, ZHONG T Y. Pollution and health risk assessment of heavy metals in urban soil in China[J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2016, 22(2): 424–434

[38] 王北洪, 马智宏, 冯晓元, 等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2736–2745
WANG B H, MA Z H, FENG X Y, et al. Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(7): 2736–2745