

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019030403

高培培, 肖冰, 刘文菊, 等. 莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 362-370.

GAO Peipei, XIAO Bing, LIU Wenju, et al. Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(2): 362-370.

莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价*

高培培 肖冰 刘文菊 张香玉 董俊文 薛培英**

(河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 保定, 071000)

摘要 以保定市市售莲藕和雄安新区白洋淀野生藕苗为研究对象, 采用硝酸-高氯酸消解体系, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和原子荧光分光光度计(AFS)测定了莲藕中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)的含量, 对比分析了市售莲藕和野生藕苗不同部位(藕肉、藕皮、藕节)重金属的含量特征, 并运用内梅罗综合污染指数法和单因子污染指数法及目标危害系数法评价了莲藕重金属污染状况及其对人体的健康风险。结果表明, 采集的莲藕样品中 Pb、Cd、As 均有不同程度超标, 其中 Pb 超标最高, 且变异系数最大(>100%), 藕肉、藕皮、藕节中 Pb 超标率分别为 23.08%、53.85% 和 38.46%。市售莲藕中重金属平均含量表现为: 藕节>藕皮>藕肉, 其中藕皮和藕节中重金属含量达轻污染($P_{\text{综}}$ 分别为 1.02 和 1.55), 藕肉中 3 种重金属含量达警戒级($P_{\text{综}}$ 为 0.85); 野生藕苗藕皮中重金属污染较为严重, 属于轻污染($P_{\text{综}}$ 为 1.44)。市售莲藕和野生藕苗中单一重金属的目标危害系数(THQ)均表现为 As>Pb>Cd, 且无论是成人还是儿童, 其 TTHQ 值均<1, 说明不存在明显的健康风险, 考虑到藕皮和藕节中重金属含量较高, 因此建议在食用莲藕时, 应削去藕皮和藕节, 以降低对成人和儿童的健康风险。

关键词 莲藕, 重金属, 健康风险。

Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root

GAO Peipei XIAO Bing LIU Wenju ZHANG Xiangyu DONG Junwen XUE Peiying**

(College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei /Key Laboratory of Ecological Environment of Farmland in Hebei, Baoding, 071000, China)

Abstract: There are increasing concerns on heavy metal contamination in vegetables such as lotus root. Selected metals including lead (Pb), cadmium (Cd) and arsenic (As) and their accumulation in commercial and wild lotus root collected from Baoding and Baiyangdian Lake were analyzed. The nemero synthesis index values and the target hazard quotient (THQ) of heavy metals in lotus root were selected to evaluate the pollution degree and their risk to human health. The contents of Pb, Cd and As in different parts of lotus root (including edible part, peel, node) were measured using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic fluorescence spectrophotometer (AFS) after digesting by nitric acid-perchloric acid. The results showed that Pb, Cd and As in 17 samples of lotus root respectively exceeded the permissible limits for food (GB 2762—2017) by varying degrees. Pb had the highest over standard rate and the highest variable coefficient (>100%), and Pb concentrations in 23.08%, 53.85% and 38.46% of the edible part,

2019 年 3 月 4 日收稿(Received: March 4, 2019).

* 国家自然科学基金(21407042)和河北省自然科学基金(D2015204109)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21407042) and the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2015204109).

** 通讯联系人, Tel 13603280681, E-mail: pyxue0812@163.com

Corresponding author, Tel 13603280681, E-mail: pyxue0812@163.com

peel and node of lotus root respectively were above the safety limits. Furthermore, as for the commercial lotus root, the average contents of Cd, Pb and As in lotus root were in the order of node > peel > edible part. The heavy metal content in peel and node of lotus root reached mild pollution (P_{syn} is 1.02 and 1.55 respectively), while the heavy metal content in edible part reached the alert level ($P=0.85$). Pollution of Cd, Pb and As in peel of wild lotus root were relatively serious, and coming up to mild pollution ($P=1.44$). What's more, THQ of heavy metals in lotus root in the pattern As > Pb > Cd, and the total THQ values for adults and children were less than 1.0, which suggested that the health risks of Cd, Pb and As exposure through consuming lotus root were generally assumed to be safe. However, considering the higher contents of Pb, Cd, As in peel and node of lotus root, it is recommended that the peel and node of lotus root are peeled off to reduce the health risk of heavy metals exposure through food chain for adults and children.

Keywords: lotus root, heavy metals, health risks.

蔬菜是为人体提供必需的维生素、矿物质、抗氧化剂和粗纤维等物质的重要农作物,但其所积累的重金属等有毒元素也会随之进入人体,严重时甚至会诱发癌症^[1-2].在我国,各种水生蔬菜年生产总面积共约 1100 万亩,其中莲藕在我国水生蔬菜作物中种植面积为最大,约为 600 万亩^[3],但由于工农业和旅游业的迅速发展,“三废”排放导致大量污染物质,如重金属排入河流、湖泊中引起水体污染^[4],从而导致水生蔬菜(如莲藕、茭白、菱角、荸荠等)体内重金属 Pb、Cd、As、汞(Hg)、铬(Cr)等超标^[5-7],这些重金属元素最终可通过食物链等途径进入人体^[8],直接或间接地危害人体健康^[9].

莲藕是我国栽培面积最大的水生蔬菜,属睡莲科多年生宿根水生植物,其含水量高、组织脆嫩,不仅营养美味,而且各部分均有药用保健价值^[10-11].有研究结果表明,在受重金属污染的水生蔬菜及水产品种植地区,莲藕中重金属含量存在不同等级的超标现象^[7,11],如许晓光对莲藕主产区 5 省 36 个采样点调查发现,莲藕中 Pb、Cd 和 As 超标率分别为 22.2%、16.67%和 11.11%^[6],祝云龙等^[12]发现大通湖及洞庭湖莲藕中 Cd 的含量是国家安全限量标准的 1—5 倍,且龙珠^[13]研究发现不同种类重金属在莲藕体内的累积量也有所不同.

然而,以往研究大多针对重金属在莲藕体内的富集规律及其对品质的影响,但是对于莲藕中重金属污染评价以及健康风险评价研究尚少.雄安新区的白洋淀作为我国华北平原地区的最大淡水湖泊,是当地莲藕种植的主要生产基地,研究表明,从 1974 至 2007 年的 30 多年里,白洋淀水质从Ⅲ类下降到Ⅳ类或劣Ⅴ类水,底泥受到重金属不同程度的污染,其中 Pb、Cd 污染较为严重^[14-16],因此莲藕的重金属污染问题需要引起重视.

基于此,本研究以保定市市售莲藕和安新县白洋淀野生藕苗为研究对象,通过分析莲藕不同部位(藕肉、藕皮、藕节)Pb、Cd、As 的含量特征,评价莲藕中重金属污染状况以及摄入人体的健康风险,旨在为保定地区居民安全摄入莲藕提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 莲藕样品的采集

采样点信息见图 1 和表 1,采样点为随机选择,共采集 13 份市售莲藕样品,4 份野生藕苗样品.在保定市莲池区、竞秀区各大农副产品批发市场、大型超市、农贸市场设置 10 个采样点,每个采样点采集 1 份市售莲藕样品,其中大韩蒋菜市场采集了 2 份莲藕样品(见表 1),共采集 11 份市售莲藕样品;安新县白洋淀设置 6 个采样点,其中 2 个采样点(用●标出)各采集 1 份市售莲藕样品,另 4 个采样点(用▲标出)各采集 1 份野生藕苗样品,共采集 2 份市售莲藕样品,4 份野生藕苗样品.

1.2 莲藕中重金属含量测定

1.2.1 莲藕样品的准备

用超纯水反复清洗莲藕样品,除去样品表面附着的杂质及金属离子,将水分沥干后,用不锈钢刀将

采集的鲜样分为藕肉、藕皮和藕节,并用匀浆机打磨成匀浆状,装入 50 mL 离心管中,于-20 ℃ 条件下冷冻保存并备用。

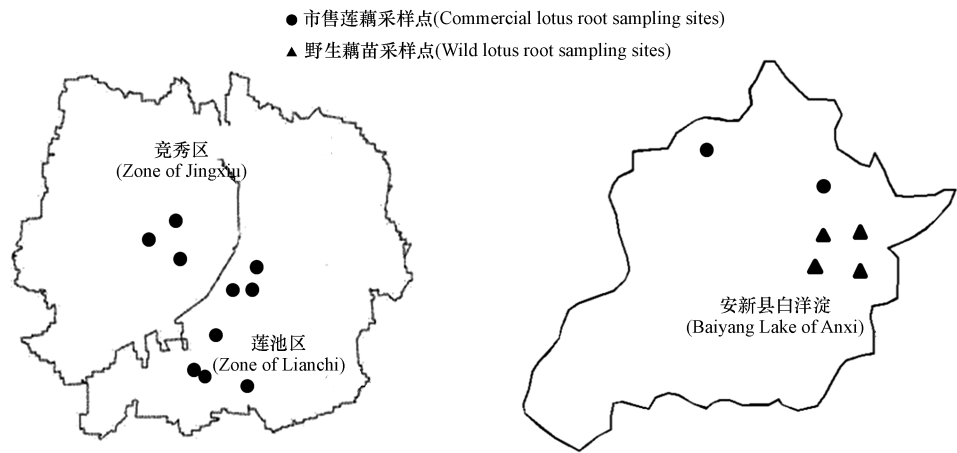


图 1 采样点分布图
Fig.1 Distribution of sampling sites

表 1 采样点地址及编号
Table 1 Address and number of sampling sites

编号 Sequence	种类 Kind	所属区域 Zone	采购地点 Location	产地 Place of origin
L-1	市售莲藕	莲池区	南二环人人超市	不详
L-2	市售莲藕	莲池区	乌马庄菜市场	安新县白洋淀
L-3	市售莲藕	莲池区	裕华西路 599 号菜市场	保定东
L-4	市售莲藕	莲池区	裕华西路 577 号银座超市	保定
L-5	市售莲藕	莲池区	长城南大街 2102 号大韩蒋菜市场	江苏
L-6	市售莲藕	莲池区	长城南大街 2102 号大韩蒋菜市场	安新县白洋淀
L-7	市售莲藕	莲池区	朝阳南大街 1990 号南刘各庄菜市场	安新县白洋淀
L-8	市售莲藕	莲池区	裕华西路 201 号北京华联超市	河北
J-1	市售莲藕	竞秀区	朝阳北大街 728 号北国先天下	不详
J-2	市售莲藕	竞秀区	朝阳南大街 8 号沃尔玛超市	安新县白洋淀
J-3	市售莲藕	竞秀区	盛兴中路早市菜市场	天津
A-1	市售莲藕	安新县	大张庄村	安新县白洋淀
A-2	市售莲藕	安新县	三台镇工堤	安新县白洋淀
A-3	野生藕苗	安新县	光淀村	安新县白洋淀
A-4	野生藕苗	安新县	寨南村	安新县白洋淀
A-5	野生藕苗	安新县	圈头村	安新县白洋淀
A-6	野生藕苗	安新县	王家寨村	安新县白洋淀

1.2.2 莲藕样品的消解

称取 1.000 g 左右莲藕(分为藕肉、藕皮和藕节)匀浆于消煮管中,并加入 10 mL 混酸($V_{\text{浓硝酸}}:V_{\text{高氯酸}}=4:1$)预消解过夜.次日,预消解的莲藕样品利用石墨消解仪进一步消解.消解仪的升温程序如下:首先在 110 ℃ 消解 2 h;130 ℃ 消解 6 h;150 ℃ 消解 1 h,至消解液中无浑浊后升温至 170 ℃ 赶酸,直到有大量白烟冒出,剩余 1 mL 左右无色澄清透明的消煮液时停止消煮,自然冷却后,定容至 25 mL.同时为了确保实验的准确性和精确性,每批次样品设置 2 个空白样品和 2 个标样(芹菜生物成分分析标准物质(GBW10048(GSB-26)))进行质控,结果表明 Pb 的平均回收率为 92.96%,Cd 的平均回收率为 83.84%,

As 的平均回收率为 107.69%(其中 Pb、Cd 和 As 的方法检测限分别为 0.02、0.002、0.01 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),表明该消煮及分析方法可行.

1.2.3 重金属含量的测定

消解液中 Pb 和 Cd 含量用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent7700X ICP-MS,安捷伦科技有限公司)进行测定,As 含量用原子荧光分光光度计(AFS-3000,北京海光有限公司)进行测定.

1.3 莲藕重金属污染评价方法及标准

按照《食品中污染物限量》GB 2762—2017 评价莲藕样品中的重金属含量,分别为 $\text{Pb}\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (新鲜蔬菜)、 $\text{Cd}\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (块根和块茎蔬菜)和 $\text{As}\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (新鲜蔬菜).

采用单因子污染指数法和内梅罗污染指数法评价莲藕中重金属污染程度.

单因子污染指数计算公式:

$$P_i = C_i / C_{0i}$$

式中, P_i 为某该污染物的指数, C_i 为该污染物实测值, C_{0i} 为该污染物评价标准值.单因子污染指数的分级标准为: $P_i\leq 1$,表示无污染; $1<P_i\leq 2$,表示轻微污染; $2<P_i\leq 3$,表示轻度污染; $3<P_i\leq 5$,表示中度污染; $P_i>5$,表示重度污染.

单因子污染指数只能代表某一种重金属的环境质量状况,不能反映其所造成的环境质量的贡献,想要突出高质量分数重金属对环境质量的影响作用,还需要采用综合污染指数进行评价^[17],如内梅罗污染指数,其计算公式:

$$P_{\text{综}} = [(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2) / 2]^{1/2}$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数, P_{ave} 为单因子污染指数的算术平均值, P_{max} 为单因子污染指数的最大值.内梅罗综合污染指数的分级标准为:当 $P_{\text{综}}\leq 0.7$ 时,属安全; $0.7<P_{\text{综}}\leq 1$,属警戒级; $1<P_{\text{综}}\leq 2$,属轻度污染; $2<P_{\text{综}}\leq 3$,属中污染; $3<P_{\text{综}}\leq 5$,属重污染; $P_{\text{综}}>5$,属严重污染.

1.4 健康风险评价方法

采用目标危害系数(target hazard quotient, THQ)法计算暴露人群的健康风险.THQ 法能同时评价单一重金属和多种重金属复合暴露的健康风险.如果 THQ 值<1,说明暴露人群没有明显的健康风险,反之,则说明暴露人群存在健康风险^[18].

单一重金属的健康风险:

$$\text{THQ} = (E_{\text{F}} \times E_{\text{D}} \times E_{\text{IR}} \times C) / (R_{\text{FD}} \times W_{\text{AB}} \times T_{\text{A}}) \times 10^{-3}$$

式中, E_{D} 为暴露时间,通常等于人均寿命,一般取 70 a^[19]; E_{F} 为人群暴露频率,一般设定为 365 d·a⁻¹^[18]; E_{IR} 为蔬菜摄入量,成人与儿童分别设定为 301.4、231.5 g·d⁻¹^[20-21]; W_{AB} 为平均体重,成人与儿童分别设定为 55.9 kg 和 32.7 kg^[21-24]; C 为蔬菜中重金属含量; T_{A} 为非致癌性平均暴露时间,取 25550 d; R_{FD} 为参考剂量,Pb 为 0.004 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[25],Cd、As 分别为 0.001、0.0003 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[18].

多种重金属的复合健康风险(TTHQ):

$$\text{TTHQ} = \sum \text{THQ}_{\text{单一金属}}$$

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 莲藕中 Pb、Cd、As 含量特征分析

莲藕不同部位(藕肉、藕皮、藕节)重金属含量特征见表 2.莲藕中 Pb、Cd、As 含量范围分别为 ND—1.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、ND—0.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、ND—0.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.龙珠等^[26]对浙中地区莲藕中重金属含量测定研究表明,莲藕中 Cd、As 含量分别为 0.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与本研究结果相似,其莲藕中 Pb 含量较高为 0.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率达 218%,远高于本研究结果,这可能与该地区土壤铅污染和水体污染等有关^[4].莲藕中藕肉和藕节的 3 种重金属变异强度均为 $\text{Pb}>\text{Cd}>\text{As}$,藕皮中则表现为 $\text{Pb}>\text{As}>\text{Cd}$,其中 Pb 变异系数最高为 103.89%—234.57%,说明莲藕中重金属 Pb 含量受外源因子干扰影响较大,研究表明工农业生产(农药化肥的生产及使用、采矿、发电、冶金、汽修和化工生产等)、交通排放(机动车尾气排放、车辆磨损等)、居民生活排放、建筑物风化和大气沉降等)^[27-30],都可能造成 Pb 污染.莲藕不同部位相比,3 种重

金属平均含量均表现为藕节>藕皮>藕肉,这可能一方面是由于在藕节和藕皮中多酚含量高于藕肉,多酚物质表面的羟基化学键与外界重金属物质结合发生络合作用,导致了藕节和藕皮中重金属含量高于藕肉^[31],另一方面可能是藕节作为根系向其它部位转运的关键部位,导致藕节中重金属含量较高。

参照《食品中污染物限量》GB 2762—2017 食品安全国家标准,采集的 17 个莲藕样品 Pb、Cd、As 含量均有不同程度超标,其中藕皮中以 Pb 超标最为严重,超标率高达 53.85%;藕肉和藕节中超标率分别为 23.08%和 38.46%;藕节中 Cd 超标率为 11.76%,藕肉和藕皮中均未超标;另外,藕皮中 As 超标率为 5.88%,藕肉和藕节中均未超标。

表 2 莲藕中 Pb、Cd、As 含量特征 (n=17)

Table 2 Concentrations characteristic of Pb, Cd, As in lotus root (n=17)

重金属 Heavy metal	藕肉 Edible part			藕皮 Peel			藕节 Node		
	Pb	Cd	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd	As
最小值/(mg·kg ⁻¹)	0.02	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	0.01	ND
最大值/(mg·kg ⁻¹)	0.39	0.07	0.15	0.57	0.07	0.70	1.68	0.14	0.36
平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.10	0.02	0.10	0.14	0.02	0.18	0.17	0.03	0.18
变异系数/%	103.89%	100.55%	40.40%	105.53%	85.63%	96.54%	234.57%	140.46%	61.61%
超标率/%	23.08%	0	0	53.85%	0	5.88%	38.46%	11.76%	0

注: ND, 未检出.ND, not detected.

不同采样点莲藕重金属含量特征如图 2 所示(按各采样点重金属含量从高到低排序).不同采样点莲藕 Pb 含量相比(图 2),乌马庄菜市场(L-2)的藕肉、藕皮和藕节中 Pb 含量均最高,分别为其它采样点的 1.34—19.5 倍、2.48—28.5 倍和 12.92—84 倍,其中,藕肉、藕皮和藕节中 Pb 分别超过标准限值 3.95 倍、5.74 倍和 16.77 倍,其次为安新县寨南村(A-4)、大张庄村(A-1)和盛兴中路早市菜市场(J-3),藕肉中 Pb 含量也较高,分别为标准限值的 2.2 倍和 2.9 倍,寨南村(A-4)和沃尔玛超市(J-2)采样点藕皮中 Pb 含量超标分别为 3.9 倍和 2.3 倍,王家寨(A-6)和大韩蒋菜市场(L-5)采样点莲藕中 Pb 含量最低.不同采样点莲藕 Cd 含量相比(图 2b),光淀(A-3)的藕节中 Cd 含量最高,是标准限值的 1.8 倍,其次是乌马庄菜市场(L-2),是标准限值的 1.4 倍,其它采样点莲藕中 Cd 含量均不超标;不同采样点莲藕不同部位 As 含量相比,只有沃尔玛超市(J-2)藕皮中 As 超标,是标准限制的 1.4 倍,其它采样点莲藕中 As 含量均不超标,检出率为 70.59%.值得注意的是,莲藕体内重金属含量超标的样品均主要来自白洋淀,并且白洋淀不同采样点的莲藕样品体内重金属含量也存在较大差异,这可能与白洋淀沉积物重金属污染有关,薛培英等^[16]对白洋淀沉积物重金属污染调查结果显示,沉积物主要为 Cd、Pb 污染,并且不同功能淀区污染程度不同,表现为生活水产养殖区>纳污区>淀边缘区,可见控制莲藕产地沉积物重金属污染尤为重要.

2.2 市售莲藕和野生藕苗不同部位重金属含量特征

市售莲藕和野生藕苗不同部位 Pb、Cd、As 含量如图 3 所示,在市售莲藕中,藕节 Pb 含量显著高于其它部位($P<0.05$),分别为藕肉和藕皮 Pb 含量的 1.77 倍和 1.52 倍,藕皮和藕节 As 含量显著高于藕肉,分别为藕肉中 As 含量的 2.64 倍和 2.60 倍,Cd 含量在不同部位之间差异不显著($P>0.05$).野生藕苗不同部位 3 种重金属分布状况与市售莲藕不同.野生藕苗藕皮中 Pb 含量显著高于其它部位,是其它部位的 2.18—2.49 倍,藕节 Cd 含量显著高于其它部位,是其它部位的 5.25—7.00 倍,而 As 含量则表现为藕肉>藕节>藕皮.

市售莲藕和野生藕苗中 Pb、Cd、As 含量不同部位的分配比例如图 4 所示.市售莲藕中 3 种重金属分布均表现为藕节(41%—45%)>藕皮(30%—42%)>藕肉(16%—27%),而野生藕苗中 3 种重金属分配规律均不同:对于 Pb 而言,藕皮中分布最多为 54%,其次为藕肉和藕节,Cd 则表现为藕节中分布最多,达 75%,其次为藕皮和藕肉,As 则表现为藕肉中最多(42%),其次为藕节(33%),藕皮中最少.可见,不同金属在野生藕苗中分配规律不同,市售莲藕和野生藕苗对金属的富集和分配能力也不同.

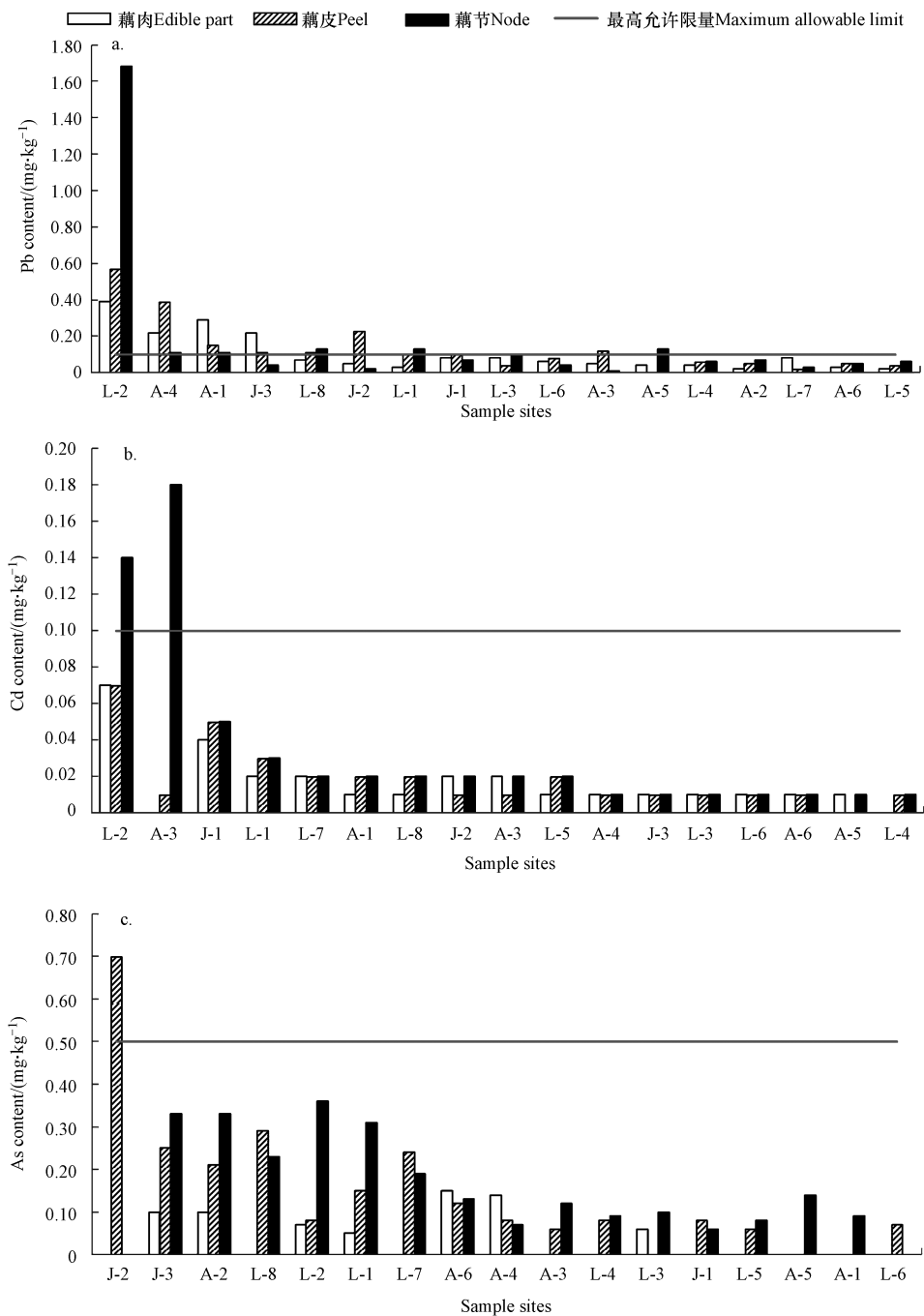


图2 不同采样点总 Pb(a)、Cd(b)、As(c) 含量特征

注:图中添加横线代表莲藕中重金属的最高允许限量值

Fig.2 Analysis of total Pb (a), Cd (b) and As (c) concentration in different sampling sites

2.3 市售莲藕和野生藕苗重金属污染评价

由表3可知,市售莲藕藕皮和藕节中3种重金属含量达到轻污染水平($P_{\text{综}}$ 分别为1.02和1.55),其中Pb污染贡献较大,单项污染指数 P_{Pb} 分别为1.3和2.0,达到轻微污染水平;市售莲藕中藕肉受到3种重金属的污染较小, $P_{\text{综}}$ 为0.85,达到警戒级水平.野生藕苗中藕皮受到重金属污染较为严重, $P_{\text{综}}$ 为1.44,达到轻污染水平,其中Pb污染贡献最大,单项污染指数 P_{Pb} 为1.9,达到轻微污染水平;藕肉和藕节较为清洁,其 $P_{\text{综}}$ 分别为0.71和0.67,属于警戒级和安全水平.综合市售莲藕和野生藕苗的污染指数来看,其Cd和As均未达到污染级别,主要是受到Pb的危害较大.除此之外,市售莲藕藕节比野生藕苗藕节污染程度更高,这可能是由于随着莲藕在自然生长期间,不断从外界环境中吸收和富集重金属污染物,经由

藕节向上或向下运输,最终导致藕节中累积重金属含量高于其它部位,但与此相关研究较少,因此其作用机理有待进一步探究和佐证.

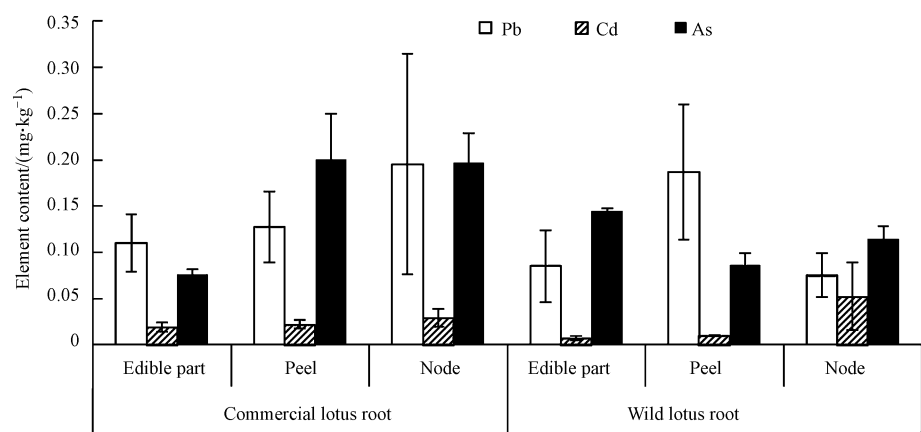


图 3 市售莲藕和野生藕苗中 Pb、Cd 和 As 的平均含量
Fig.3 Average Pb, Cd and As concentrations in commercial and wild lotus root

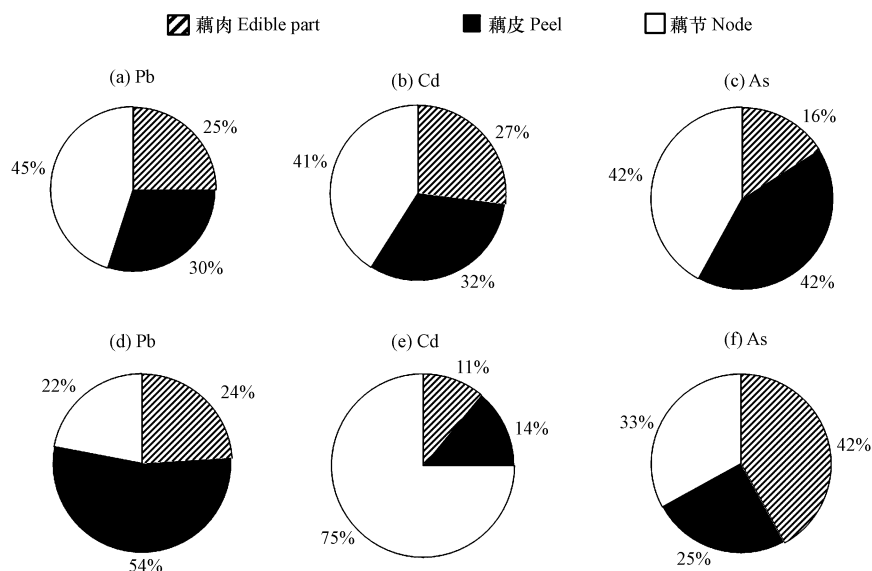


图 4 市售莲藕(图 a,b,c)和野生藕苗(图 d,e,f)中 Pb、Cd 和 As 的分配比例
Fig.4 Distribution ratio of Pb, Cd and As in commercial(a, b, c) and wild lotus root(d, e, f)

表 3 市售莲藕和野生藕苗污染指数
Table 3 Pollution index of commercial and wild lotus root

类型 Type	莲藕部位 Different tissues	单项污染指数 P_i Individual pollution index			综合污染指数 $P_{综}$ Comprehensive pollution index	污染程度 Pollution degree
		Pb	Cd	As		
市售莲藕	藕肉	1.1	0.2	0.15	0.85	警戒级
	藕皮	1.3	0.2	0.4	1.02	轻污染
	藕节	2.0	0.3	0.39	1.55	轻污染
野生藕苗	藕肉	0.9	0.1	0.29	0.71	警戒级
	藕皮	1.9	0.1	0.17	1.44	轻污染
	藕节	0.8	0.5	0.23	0.67	安全

2.4 健康风险评价结果

市售莲藕和野生藕苗藕肉中重金属健康风险评价结果见表 4.无论是市售莲藕还是野生藕苗,单一

重金属的 THQ 值均表现为 $As>Pb>Cd$, 通过将单一重金属对成人和儿童健康的潜在危险进行比较, 计算各重金属对复合健康风险的贡献率, 野生藕苗中 TTHQ 分别比市售莲藕中高 1.30 倍和 1.32 倍, 但 TTHQ 值均 <1 , 这说明对成人和儿童不会造成明显的健康风险, 考虑到儿童对蔬菜的摄入量低于成人, 但其 THQ 值均大于成人, 可以表明儿童对重金属污染更为敏感^[32]. 生活在保定和雄安新区周围的居民接触重金属的途径有很多, 如呼吸、皮肤接触和口腔摄入等, 其中口腔摄入所占比重较大, 因此, 食用蔬菜所带来的安全隐患必须引起足够的重视.

表 4 莲藕藕肉中重金属健康风险评价
Table 4 THQ in lotus root's edible part

类型 Type	目标危害系数 THQ	成人 Adults	儿童 Children
市售莲藕	Pb	0.15	0.20
	Cd	0.11	0.14
	As	0.27	0.35
	TTHQ 值	0.53	0.69
野生藕苗	Pb	0.12	0.16
	Cd	0.05	0.07
	As	0.52	0.68
	TTHQ 值	0.69	0.91

3 结论 (Conclusion)

(1) 参照《食品中污染物限量》GB 2762—2017 食品安全国家标准, 采集的 17 个莲藕样品 (分为藕肉、藕皮和藕节) 中重金属 Pb、Cd 和 As 有不同程度超标现象, 且 Pb 变异系数最大. 与野生藕苗相比, 市售莲藕藕节处富集的 Pb 和 As 含量均高于野生藕苗.

(2) 市售莲藕藕肉中 Pb、Cd 和 As 综合污染程度属于警戒级, 藕皮和藕节中属于轻污染; 野生藕苗藕肉中 Pb、Cd 和 As 综合污染程度属于警戒级, 藕皮中属于轻污染, 藕节属于安全. 市售莲藕和野生藕苗的藕肉中单一重金属的 THQ 值均表现为 $As>Pb>Cd$, 但无论是成人还是儿童, 3 种重金属复合污染的 TTHQ 值均 <1 , 说明不存在明显的健康风险, 考虑到藕皮和藕节中重金属含量略高, 因此建议在食用莲藕时, 削去藕皮和藕节, 以降低对成人和儿童的健康风险.

综上所述, 本研究结果表明保定市市售莲藕和安新县白洋淀野生藕苗中重金属 Pb、Cd 和 As 均受到不同程度污染, 虽然对当地居民尚未造成明显的健康风险, 但随着污染物排放的增多, 有必要对莲藕产地污染状况进行进一步研究, 明确莲藕中金属的来源以及莲藕对金属污染物的吸收富集途径, 为合理有效的控制莲藕中污染物浓度, 保障食品安全提供重要依据.

参考文献 (References)

[1] PANDEY R, SHUBHASHISH K, PANDEY J. Dietary intake of pollutant aerosols via vegetables influenced by atmospheric deposition and wastewater irrigation[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 76: 200-208.

[2] ZARENA A S, SANKAR K U. Screening of xanthone from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) peels and their effect on cytochrome reductase and phosphomolybdenum activity[J]. Journal of Natural Products (India), 2009, 2: 23-30.

[3] 胡晓潇. 常见水生蔬菜提取物生物活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.

HU X X. Common aquatic vegetable extract biological activity research[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017 (in Chinese).

[4] 王方园, 龙珠, 徐金玲, 等. 浙中地区水生蔬菜及其生长环境重金属污染调查与评价[J]. 浙江师范大学学报, 2016, 39(3): 338-345.

WANG F Y, LONG Z, XU J L, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution for aquatic vegetables and its growing environment in the middle area of Zhejiangp[J]. Journal of Zhejiang Normal University, 2016, 39(3): 338-345 (in Chinese).

[5] 尚素微, 吴翠蓉, 蒋步云. 浙江省 3 种野菜重金属含量的测定[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 266-267.

SHANG S W, WU C R, JIANG B Y. Determination of heavy metals in 3 wild vegetables in Zhejiang[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(4): 266-267 (in Chinese).

[6] 许晓光. 莲藕重金属累积特性及田间残留现状调查[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.

XU X G. Accumulation of heavy metals in Lotus Root (*Nelumbo nucifera*) and investigation of their residues in soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011 (in Chinese).

- [7] 罗竞,刘义满,孙亚林,等. 菜用睡莲栽培土壤和灌溉水铅、汞及镉安全指标验证试验[J]. 湖北农业科学,2017,56(6):1080-1084. LUO J, LIU Y M, SUN Y L, et al. Verification experiment on the safety index limits for Pb, Hg and Cd content of soil and irrigation water for edible waterlily cultivation[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017,56(6):1080-1084 (in Chinese).
- [8] 罗婷,丁颖,孙健雄,等. 江苏苏北湿地土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境化学,2018,37(5):984-993. LUO T, DING Y, SUN J X, et al. Pollution characteristics and assessment of heavy metals in wetland soil in the area of northern Jiangsu Province[J]. Environmental Chemistry,2018,37(5):984-993 (in Chinese).
- [9] 中国科学院武汉植物研究所.中国莲[M]. 北京:科学出版社,1987. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences. Chinese lotus[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese).
- [10] 周明全,何建军,胡中立.湖北莲藕产业发展的若干设想及建议[J]. 氨基酸和生物资源,2002,24(4):22-24. ZHOU M Q, HE J J, HU Z L. Some ideas and suggestions on the development of lotus root industry in Hubei[J]. Amino Acids & Biotic Resources,2002,24(4):22-24 (in Chinese).
- [11] 刘义满,彭静,钟兰,等.菜用睡莲营养成分及重金属含量测定与评价[J]. 湖北农业科学,2016,55(14):3730-3732. LIU Y M, PENG J, ZHONG L, et al. Determination and evaluation of nutrient and heavy metal content of edible waterlily (*Nymphaea tetragona*) [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016,55(14):3730-3732 (in Chinese).
- [12] 祝云龙,孙小舟,胡亚辉. 大通湖及东洞庭湖菱蒿中重金属元素的含量特征[J]. 江苏农业科学,2014,42(2):248-250. ZHU Y L, SUN X Z, HU Y H. Characteristics of heavy metal in *Artemisia selengensis* in Datong Lake and East Dongting Lake[J]. Jiangsu Nongye Kexue, 2014,42(2):248-250 (in Chinese).
- [13] 龙珠.水生蔬菜及其生长环境重金属污染特征与防控研究[D]. 金华:浙江师范大学,2016. LONG Z. Heavy metals pollution characteristics of aquatic vegetables and it's growth environment and the research of prevention and control [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2016 (in Chinese).
- [14] 庄长伟,欧阳志云,徐卫华,等.近33年白洋淀景观动态变化[J]. 生态学报,2011,31(3):839-848. ZHUANG C W, OUYANG Z Y, XU W H, et al. Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(3):839-848 (in Chinese).
- [15] 鲁成秀.富营养化湖泊沉积物—水界面重金属释放的生物化学过程研究[D]. 济南:山东师范大学,2016. LU C X. Biochemical process of released heavy metals on the sediment-water interface of eutrophic Lakes [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2016 (in Chinese).
- [16] 薛培英,王亚琼,赵全利,等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统重金属污染分布特征研究[J]. 湖泊科学, 2018,30(6):1525-1536. XUE P Y, WANG Y Q, ZHAO Q L, et al. Distribution characteristics of heavy metals in sediment-submerged macrophyte-water systems of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(6):1525-1536 (in Chinese).
- [17] 褚卓栋,刘文菊,肖亚兵,等. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况评价[J]. 环境科学, 2010, 31(6):1601-1607. CHU Z D, LIU W J, XIAO Y B, et al. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from chinese herbal medicine cultivated regions[J]. Environmental Science, 2010, 31(6):1601-1607 (in Chinese).
- [18] US EPA. Risk based concentration table[R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2000.
- [19] BENNETT D, KASTENBERG W E, MCKONE T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 63(2):185-198.
- [20] 李绥晶,李欣,李辉,等.辽宁省城乡居民膳食营养与健康状况调查[J]. 中国公共卫生,2005,21(11):1308-1309. LI S J, LI X, LI H, et al. Survey on dietary nutrition and health status of urban and rural residents in Liaoning[J]. Chinese Journal of Public Health,2005,21(11):1308-1309 (in Chinese).
- [21] WANG X, SATO T, XING B, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish[J]. Science of the Total Environment, 2005,350(3):28-37.
- [22] GOMEZ B, PALACIOS M A, GOMEZ M, et al. Levels and risk assessment for humans and ecosystems of platinum-group elements in the airborne particles and road dust of some European cities[J]. Science of the Total Environment, 2002,299(1/3):1-19.
- [23] 陈鸿汉,谌宏伟,何江涛,等.污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. 地学前缘,2006,13(1):216-223. CHEN H H, SHEN H W, HE J T, et al. Health-based risk assessment of contaminated sites: Principles and methods[J]. Earth Science Frontiers, 2006,13(1):216-223 (in Chinese).
- [24] 王宗爽,段小丽,王贝贝,等.土壤/尘健康风险评价中的暴露参数[J]. 环境与健康杂志,2012,29(2):114-117. WANG Z S, DUAN X L, WANG B B, et al. Exposure factors in health risk assessment for soil and dust exposure [J]. Journal of Environment and Health, 2012,29(2):114-117 (in Chinese).
- [25] FAO/WHO. List of contaminants and their maximum levels in foods[R]. Geneva: World Health Organization, 1984.
- [26] 龙珠,徐金玲,王方园,等.浙中地区水生蔬菜及其生长环境重金属风险评价[J]. 浙江农业科学,2016,57(10):1580-1585. LONG Z, XU J L, WANG F Y, et al. Risk assessment of heavy metals in aquatic vegetables and their growing environment in the middle area of Zhejiang[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2016,57(10):1580-1585 (in Chinese).
- [27] SEZGIN N, OZCAN H K, DEMIR G, et al. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway[J]. Environ Int,2004,29(7):979-985.
- [28] AHUNED F, ISHIGA H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka City, Bangladesh[J]. Atmos Environ, 2006,40(21):3835-3844.
- [29] WEI B, YANG L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchem J,2010,94(2):99-107.
- [30] 王丽,陈凡,马千里,等. 东江淡水河流域地表水和沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境化学,2015,34(9):1671-1684. WANG L, CHEN F, MA Q L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface water and sediment in Danshui river of Dongjiang[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9):1671-1684 (in Chinese).
- [31] 徐燕燕.莲藕不同部位多酚组成及抗氧化活性研究[D]. 武汉:武汉轻工大学,2015. XU Y Y. Study on the composition and antioxidant activity of phenolics from different parts of lotus root [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015 (in Chinese).
- [32] 韩娟,赵金莉,贺学礼.白洋淀植物重金属积累特性的研究[J]. 河北农业大学学报,2016,39(4):31-36. HAN J, ZHAO J L, HE X L. Characteristics of heavy metals enrichment in plant species growing in Baiyangdian [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016,39(4):31-36 (in Chinese).