DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.H20260209006
引用格式: 朱卫芳, 周雨瑞, 宋佳. 2022—2024 年上海青浦地产蔬菜中 4 种重金属污染现状及膳食风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 65–74.
Zhu Weifang, Zhou Yumen, Song Jia. Pollution status of 4 kinds of heavy metals and dietary risk analysis of local vegetables in Qingpu District, Shanghai in 2022—2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 65–74. (in Chinese with English abstract).

2022—2024 年上海青浦地产蔬菜中 4 种重金属污染现状及膳食风险分析

朱卫芳[1], 周雨瑞[2], 宋 佳[1*]
(1. 上海市青浦区农产品质量安全中心, 上海 201799; 2. 上海市农产品质量安全中心, 上海 201708)

摘 要: 目的 分析上海市青浦区蔬菜重金属的污染特征及膳食摄入风险。**方法** 2022—2024 年期间采集上海青浦地产 6 类主栽蔬菜的 809 份蔬菜样品, 采用微波消解、电感耦合等离子体质谱法测定总砷、总汞、铅、镉含量。采用单因子污染指数法(single-factor pollution index, P_i)、内梅罗综合污染指数法(Nemerow comprehensive pollution index, P_N)评估其污染水平, 通过目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)和综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)评估膳食摄入健康风险。**结果** 809 份蔬菜样品重金属检出率 80.2%, 4 种重金属检出率由高到低依次为镉>总砷>铅>总汞, 平均含量依次为: 铅(0.0408 mg/kg)>镉(0.0182 mg/kg)>总砷(0.0123 mg/kg)>总汞(0.0013 mg/kg), 所有样品均符合 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》要求, P_i<1; 不同类别蔬菜的 P_N 均小于 0.7, 其排序为茄果类=葱蒜类>瓜类>水生蔬菜类>绿叶菜类>白菜类; 单重金属的 THQ 由高至低为总砷>镉>铅>总汞; 整体上不同蔬菜类别的 TTHQ 排序为绿叶菜类>瓜类>白菜类>葱蒜类>水生蔬菜类>茄果类; 成人与儿童的 TTHQ 均小于 1。**结论** 上海青浦区域地产蔬菜总砷、总汞、铅、镉未表现污染情况, 处于安全水平; 通过膳食摄入蔬菜中的 4 种重金属对研究人群无明显健康风险。

关键词: 蔬菜; 重金属; 污染指数; 膳食风险
中图分类号: R994.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0065–10

Pollution status of 4 kinds of heavy metals and dietary risk analysis of local vegetables in Qingpu District, Shanghai in 2022—2024

ZHU Wei-Fang[1], ZHOU Yu-Men[2], SONG Jia[1*]
(1. *Agricultural Product Quality and Safety Center of Qingpu District*, *Shanghai* 201799, *China*; 2. *Shanghai Agri-products Quality and Safety Center*, *Shanghai* 201708, *China*)

ABSTRACT: Objective To evaluate the pollution characteristics of heavy metals in vegetables from Qingpu

收稿日期: 2026-02-09
基金项目: 农业科技创新与发展项目(SCAQS-2025-05)
第一作者: 朱卫芳(1972—), 女, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全监管、检测。E-mail: shqpnj@163.com
***通信作者:** 宋佳(1986—), 女, 农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全监管、检测。E-mail: shqpnj@126.com

District, Shanghai and analyze the risk of dietary intake. **Methods** A total of 809 vegetable samples from 6 major vegetable categories were continuously collected over 3 years from 2022 to 2024. The content of total arsenic, total mercury, lead and cadmium were determined by microwave digestion and inductively coupled plasma mass spectrometry. The pollution levels were assessed using the single-factor pollution index (P_i) and Nemerow comprehensive pollution index (P_N). The health risks of dietary intake were evaluated using the target hazard quotient (THQ) and total target hazard quotient (TTHQ). **Results** The detection rate of heavy metals in 809 vegetable samples was 80.2%. The detection rates of the 4 kinds of heavy metals ranked in descending order: cadmium>total arsenic>lead>total mercury, their average content were ranked as lead (0.0408 mg/kg)>cadmium (0.0182 mg/kg)>total arsenic (0.0123 mg/kg)>total mercury (0.0013 mg/kg). All samples complied with the limits specified in GB 2762—2022 *National food safety standard-Contaminant limits in food*, with all P_i<1. The P_N of different vegetable categories was all less than 0.7, and the order was solanaceous vegetables=onion and garlic vegetables>cucurbit vegetables>aquatic vegetables>leafy vegetables>cabbage vegetables. The single heavy metal THQ from high to low was total arsenic>cadmium>lead>total mercury. Overall, the order of TTHQ for different vegetable categories was leafy vegetables>cucurbit vegetables>cabbage vegetables>onion and garlic vegetables>aquatic vegetables>solanaceous vegetables. The TTHQ for both adults and children was less than 1. **Conclusion** The vegetables produced in Qingpu District of Shanghai are not contaminated by total arsenic, total mercury, lead and cadmium, and are at a safe level. There is no significant health risk to the study population from dietary intake of these 4 kinds of heavy metals in vegetables.

KEY WORDS: vegetables; heavy metal; pollution index; dietary risk

0 引 言

上海作为工业发达的沿海城市，重金属污染来源广泛。工业生产活动、机械尾气排放、化肥和农药兽药的不合理使用都会产生重金属污染，并随着污水、雨水、化肥等在土壤中积累。由于酸性、高湿等环境因素，更多重金属以游离离子形式存在，其活性大大提高，并因其易积累、难挥发、毒性大和隐蔽性强等特点，会通过植物根系吸收并富集[1–2]。

在膳食危害方面，重金属危害也具有一定的隐蔽性，短期摄入不易引起明显症状，但通过食物链会在人体中蓄积，长期进食重金属污染的食物极易对机体产生毒害作用，出现不可逆的损伤。蔬菜作为每日所需的重要农产品，中国居民膳食指南(2022 版)建议每天应摄入 300~400 g，若长期食用受重金属污染蔬菜，对居民健康有潜在威胁。有较显著危害的重金属如：铅会引起神经系统和消化系统疾病、镉会导致骨骼变形、而汞和砷会导致心脏衰竭和肺功能受损[3–5]。

近几年针对上海地区的重金属污染评价文献大多集中在环境污染评价，有研究分析了上海市闵行区、松江区、浦东新区、青浦和奉贤等 8 个区的土壤重金属含量并进行了安全性评价[6–9]，但对上海市地产蔬菜重金属污染情况和健康风险评估较少，部分研究仅对浦东新区、崇明区、虹口区和闵行区 4 个区的蔬菜开展重金属污染及健康风险评估[10–13]。而上海 9 个涉农区供应了全市 80%以上的食用蔬菜农产品的需求量[14]。根据 2021—2024 年青浦区国民经济和社会发展统计公报，青浦区作为上海市郊主要的蔬菜基地，常年菜田面积 2700 hm^2 以上，水生蔬菜茭白种植面积占全市的 99%以上，叶类蔬菜常年供应量在 25 万吨以上。在种植过程中，易受到土壤、肥料、灌溉水及空气的重金属污染。因此，跟踪监测蔬菜中重金属的含量和污染水平，评价蔬菜重金属污染状况及评估其健康风险是必要的。

鉴于此，本研究以上海市青浦区地产蔬菜总砷、总汞、铅、镉 4 种重金属的含量监测及健康风险评估，为保障居民蔬菜食用安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蔬菜样品涵盖上海市青浦区全部街镇(11 个)及农业园区，样品生产年份包含 2022 年—2024 年的地产蔬菜，共 809 份。参考标准 NY/T 2103—2011《蔬菜抽样技术规范》开展随机抽样。主要品种为绿叶类(如生菜、菠菜、茼蒿)、白菜类(如青菜、鸡毛菜等)、水生蔬菜类(如茭白)、茄果类(如茄子、蕃茄、菜椒等)、瓜类(如黄瓜、丝瓜、瓠瓜等)、葱蒜类(葱、大蒜、韭菜)等 6 类蔬菜。

硝酸(光谱纯，上海安谱实验科技股份有限公司)；混合标准溶液(砷、铅、镉、汞，质量浓度 100.0 μg/mL，国家

有色金属及电子材料分析测试中心)。

1.2　仪器与设备

NexION1000 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer Inc.公司); PL403-IC 型电子天平(感量 0.01 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司); MARS 6 CLASSIC 微波消解仪(美国 CEM 公司); EG37B 可调式电热板(莱伯泰科仪器股份有限公司); UPT-II-5T 实验室超纯水机(四川优普超纯水科技有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　蔬菜重金属检测方法

采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)进行检测。试样消解采用微波消解法, 称取样品 0.5 g, 加入 5 mL 硝酸后, 加盖静置 1 h 预消解。之后使用微波消解仪进行消解, 温度设定 190 ℃, 升温时间 30 min, 恒温时间 35 min, 功率 1600 W。消解后在仪器中自然降温 30 min 后取出, 冷却后缓慢打开罐盖排气, 用少量超纯水将内盖上残留的消解液冲洗到消解罐中与原有的消解液合并, 之后将盛有消解液的消解罐放置在可调式电热板上, 100 ℃加热 30 min, 去除消解产生的棕色氮氧化物。消解罐在室温下放至冷却后, 少量多次地将消解液转移到 50 mL 容量瓶中, 用超纯水定容至刻度混匀后上机测定。通过运用多平行数据、实物标样等手段开展实验质控, 以保障数据的准确性。方法检出限分别为总砷 0.002 mg/kg、总汞 0.001 mg/kg、铅 0.02 mg/kg、镉 0.002 mg/kg。

1.3.2　蔬菜重金属污染评价方法

采用单因子污染指数法(single factor pollution index, P_i)、内梅罗综合污染指数法(Nemerow comprehensive pollution index, P_N)对蔬菜重金属污染水平进行评价[15–16], 通过采用两种统计方法, 兼顾样品中不同污染的种类及含量, 更全面地反映样品重金属污染情况, 污染指数(P)越大, 说明受到的重金属污染越严重。

P_i 计算如公式(1):

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

式中: P_i 为污染因子 i 的单项污染指数; C_i 为污染物 i 的实测值; S_i 为污染物 i 的评价标准, 按照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定见表 1。污染评价指数等级: $P_i \leqslant 1.0$, 未受污染; $P_i > 1.0$, 受污染。

P_N 计算如公式(2):

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\max}{}^2 + P_{i\text{ave}}{}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: P_N 为综合污染指数; $P_{i\max}$ 为各单项污染指数中最大值; $P_{i\text{ave}}$ 为各单项污染指数平均值。污染评价指数等级: $P_N \leqslant 0.7$, 安全; $0.7 < P_N \leqslant 1.0$, 警戒; $1.0 < P_N \leqslant 2.0$, 轻污染; $2.0 < P_N \leqslant 3.0$, 中污染; $P_N \geqslant 3.0$, 重污染。

表 1　蔬菜中总砷、总汞、铅、镉限量标准

Table 1　Limits standard of total arsenic, total mercury, lead and cadmium in vegetables

蔬菜类别	金属名称	限量/(mg/kg)
绿叶菜类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.3
	镉	0.2
白菜类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.3
	镉	0.2
水生蔬菜类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.1
	镉	0.05
葱蒜类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.3
	镉	0.2
瓜类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.3
	镉	0.2
茄果类	总砷	0.5
	总汞	0.01
	铅	0.3
	镉	0.2

1.3.3　蔬菜重金属健康风险评估方法

采用美国国家环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)提出的健康风险评价模型, 计算每日估计摄入量(acceptable daily intake, ADI)来评估蔬菜重金属的日暴露水平, 采用目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)和综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)评估蔬菜中总砷、总汞、铅、镉等重金属的非致癌健康风险, 参考 GB 2762—2022 对多数食品仅规定总砷和总汞限量, 及国际层面, 联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)食品法典委员会对蔬菜中砷、汞限量也以总量为指标, 因此最终计算为了更符合国际通行规则和主流监管口径一致, 不进一步评估无机砷及甲基汞风险。每日估计摄入量、目标危险系数计算如公式(3)~(5)。

$$\text{EDI} = \frac{c \times \text{IR}_{\text{food}}}{\text{BW}} \tag{3}$$

$$\text{THQ} = \frac{\text{EDI}}{\text{RfD}} \times 0.001 \tag{4}$$

$$\text{TTHQ} = \sum \text{THQ} \tag{5}$$

式中: EDI 为经蔬菜途径每日估计摄入重金属的量(estimated

daily intake), μg/(kg bw • d); c 为蔬菜中重金属含量, mg/kg, 取检测值的平均值(未检出样品以方法检出限计); IR_{food} 为蔬菜日均摄入量(food intake reference), g/d, 成年人和儿童分别为 301.4 g/d, 231.5 g/d[17]; BW 为体重(body weight), kg; 成年人和儿童分别为 60.0 g/d, 32.7 g/d[17]。THQ 为目标危险系数; RfD 为口服参考剂量[18–19](reference dose), mg/(kg • d), 砷、汞、铅、镉的 RfD 分别为 0.0003、0.0003、0.0036、0.001 mg/(kg • d); TTHQ 为总目标危险系数。当 THQ≥1 时, 可能会有一定的危险性; 当 THQ<1 时, 可能不具有潜在危险性。当 TTHQ<1 时, 表示非致癌风险较小; 当 TTHQ>1 时, 表示非致癌风险较大。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 对实验数据进行录入、整理及绘图, 所有未检出样品结果以方法检出限代替, 采用 Excel 2007 数据分析软件分析不同年度、不同蔬菜类别间重金属污染指数和膳食摄入风险系数的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 蔬菜中重金属含量分析

809 个蔬菜重金属检测样品共有 649 个样品有检出重金属残留, 检出率 80.2%。由表 2 可知, 蔬菜中各重金属残留检出率由高到低分别为镉>总砷>铅>总汞, 蔬菜中各重金属残留含量平均值由高到低分别为铅>镉>总砷>总汞。而区域内蔬菜产地土壤总砷、总汞、铅、镉等 4 种重金属残留量平均值由高到低分别为铅>总砷>镉=总汞。土壤环境与蔬菜重金属含量存在差异, 结合冯英等[20]、Chang 等[21]的研究, 不同重金属在土壤-蔬菜中的迁移和累计情况受多方因素影响, 总体表现来看, 青浦区的蔬菜, 砷和铅的迁移较弱, 镉迁移率高并较易被吸收。

蔬菜中铅呈现检出率低但含量高的特征, 分析原因包括: (1)青浦区历史工业发展及交通枢纽发达导致环境铅积累, (2)长期使用含有铅元素的氮肥、塑料薄膜等投入品[22], (3)现有对铅利用广泛的相关工业企业排放含有铅的废渣、废水及废气, 破坏了土壤环境[23]。总砷、总汞、铅检出最小值和中位值相同, 为方法检出限, 镉中位值高于方法检出限。样品中各种重金属含量平均值高于中位值, 呈偏态分布, 变异系数以总砷为最大, 总汞为最小。各种重金属检出最大值与表 1 比较, 均小于标准规定。

由表 3 可知, 4 种重金属在不同类别蔬菜的平均含量由高到低分别为: 总砷平均含量瓜类>绿叶菜类>水生蔬菜类>白菜类>葱蒜类>茄果类; 总汞平均含量不同类别蔬菜在 0.0010~0.0015 mg/kg, 变化极小; 铅平均含量绿叶菜类>白菜类>茄果类>葱蒜类=瓜类>水生蔬菜类; 镉平均含量绿叶菜类>白菜类>葱蒜类>茄果类>瓜类>水生蔬菜类。4 种重金属在不同类别蔬菜的检出率由高到低分别为: 总砷检出率水生蔬菜类>绿叶菜类>白菜类>葱蒜类>瓜类>茄果类; 总汞检出率绿叶菜类>白菜类>葱蒜类>茄果类>瓜类>水生蔬菜类; 铅检出率绿叶菜类>白菜类>茄果类>葱蒜类>瓜类>水生蔬菜类; 镉检出率茄果类>白菜类>绿叶菜类>葱蒜类>瓜类>水生蔬菜类。水生蔬菜类 4 种重金属总含量最低, 其次为茄果类蔬菜。对表 3 不同类别蔬菜 4 种重金属残留平均含量和检出率进行方差分析, 4 种重金属元素间平均含量存在显著差异(P<0.01), 但不同蔬菜类别间没有显著性差异(P>0.05); 4 种重金属元素间检出率存在显著差异(P<0.01), 但不同蔬菜类别间没有显著性差异(P>0.05)。

分析 2022—2024 年时间跨度上不同类别蔬菜的重金属变化情况, 由图 1 可知, 年度间各类别重金属检出率变化不规律, 可能受生长环境条件影响较大, 但蔬菜镉检出率均明显高于其他 3 个重金属, 其次为砷, 铅第三, 汞最低。2023 年度绿叶菜类、白菜类、水生蔬菜类、瓜类蔬菜的铅平均含量明显高于 2022 和 2024 年, 其他重金属平均含量总体变化较小或呈下降趋势, 以绿叶菜类和白菜类等叶类蔬菜的总砷和镉下降较为明显。

表 2 2022—2024 年不同类别蔬菜中重金属总体检测情况及土壤背景值

Table 2 Overall detection situation of heavy metals in different categories of vegetables and soil background values in 2022—2024

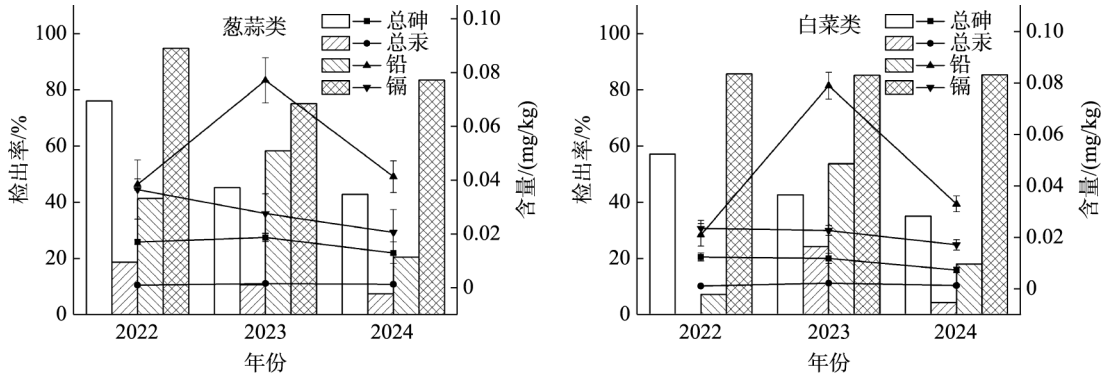
重金属名称	蔬菜检出结果					土壤平均含量/(mg/kg)
	总检出率/%	总含量范围/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	变异系数	
总砷	46.1	0.002~0.480	0.0020	0.0123	2.6	6.79
总汞	8.2	0.001~0.010	0.0010	0.0013	0.9	0.16
铅	25.5	0.020~0.294	0.0200	0.0408	1.2	24.00
镉	63.2	0.002~0.178	0.0123	0.0182	1.2	0.16
合计	80.2	/	/	/	/	/

注: /表示未有此项数据。

表 3　2022—2024 年不同类别蔬菜中重金属含量水平

Table 3　Heavy metal content levels in different categories of vegetables in 2022—2024

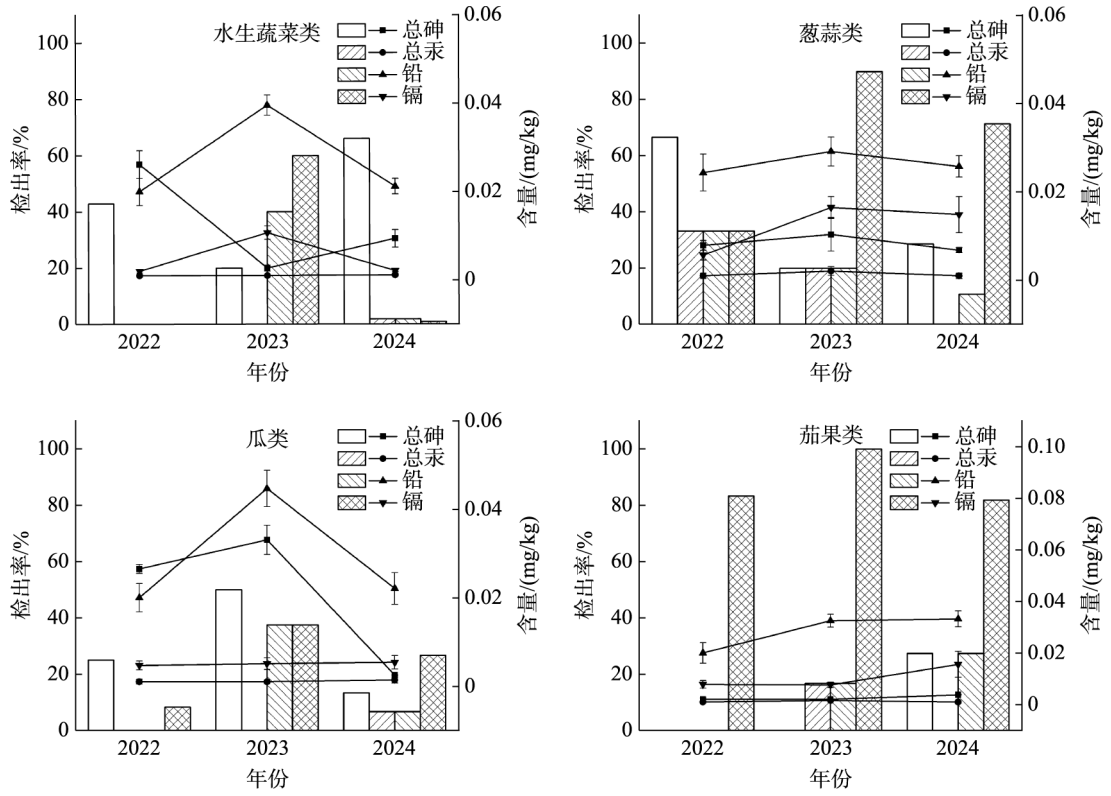
蔬菜类别	重金属名称	检出结果				
		检出率/%	含量范围/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	变异系数
绿叶菜类	总砷	49.7	0.002~0.480	0.0020	0.0150	1.3
	总汞	10.3	0.001~0.010	0.0010	0.0013	0.8
	铅	32.7	0.020~0.294	0.0200	0.0485	1.4
	镉	83.8	0.002~0.178	0.0167	0.0252	2.6
白菜类	总砷	38.7	0.002~0.133	0.0020	0.0089	1.8
	总汞	9.4	0.001~0.009	0.0010	0.0015	1.0
	铅	27.2	0.020~0.293	0.0200	0.0450	1.2
	镉	85.3	0.002~0.086	0.0153	0.0190	0.8
水生蔬菜类	总砷	61.8	0.002~0.210	0.0078	0.0109	1.8
	总汞	1.5	0.001~0.005	0.0010	0.0010	0.4
	铅	3.1	0.020~0.091	0.0200	0.0218	0.5
	镉	3.1	0.002~0.037	0.0020	0.0024	1.3
葱蒜类	总砷	29.3	0.002~0.081	0.0020	0.0077	1.9
	总汞	7.3	0.001~0.010	0.0010	0.0013	1.1
	铅	14.6	0.020~0.099	0.0200	0.0265	0.7
	镉	73.2	0.002~0.048	0.0127	0.0146	0.8
瓜类	总砷	25.7	0.002~0.280	0.0020	0.0177	3.1
	总汞	2.9	0.001~0.007	0.0010	0.0012	0.8
	铅	11.4	0.020~0.095	0.0200	0.0265	0.7
	镉	22.9	0.002~0.034	0.0020	0.0051	1.4
茄果类	总砷	13.0	0.002~0.010	0.0020	0.0028	0.8
	总汞	4.3	0.001~0.005	0.0010	0.0012	0.6
	铅	17.4	0.020~0.095	0.0200	0.0296	0.8
	镉	87.0	0.002~0.033	0.0092	0.0115	0.7



注: 柱状图代表检出情况, 折线图代表含量情况。

图 1　2022—2024 年不同类别蔬菜中 4 种重金属变化

Fig.1　Changes of 4 kinds of heavy metals in different categories of vegetables from 2022 to 2024



注：柱状图代表检出情况，折线图代表含量情况。

图 1(续) 2022—2024 年不同类别蔬菜中 4 种重金属变化

Fig.1 Changes of 4 kinds of heavy metals in different categories of vegetables from 2022 to 2024

2.2 蔬菜重金属污染评价

809 份样品实测值均在标准限量以下，P_i 在 0.00~0.99 之间，均小于 1.0，表明近 3 年抽样监测样品均未受污染。

由表 4 不同蔬菜类别重金属综合污染评价，若以所有样品的平均值计，P_i 分别为总砷 0.02、总汞 0.13、铅 0.41、镉 0.36，各种重金属在不同蔬菜的 P_i 在 0.01~0.30 之间；6 类蔬菜总体 P_N 为 0.33，不同类别蔬菜 P_N 在 0.13~0.24 之间，均小于 0.7，处于安全等级，P_N 由高到低依次为茄果类=葱蒜类>瓜类>水生蔬菜类>绿叶菜类>白菜类，茄果类和葱蒜类蔬菜最高(0.24)，白菜类蔬菜最低(0.13)。经方差分析，不同蔬菜类别间 P_i 没有显著性差异(P>0.05)，但不同重金属元素间 P_i 存在极显著差异(P<0.01)。

分别评价 2022、2023、2024 年的重金属 P_N，由表 4 可知，分年度各类蔬菜 P_N 在 0.10~0.34，均小于 0.7，处于安全等级，以绿叶类和白菜类等叶菜类蔬菜为最安全。2022 年度各类别蔬菜 P_N 为 0.10~0.19，葱蒜类最高，白菜类最低；2023 年度各类别蔬菜 P_N 为 0.21~0.34，瓜类最高，绿叶菜类最低；2024 年度各类别蔬菜 P_N 为 0.10~0.27，茄果类最高，白菜类最低。各年度所有样品 P_N 分别为 0.40、0.55、0.27，以 2023 年为最高。经方差分析，2022 至 2024 年不同年度间 P_N 有极显著差异(P<0.01)，各蔬菜类别间 P_N 也有显著差异(P<0.05)。

2.3 不同人群健康风险评估

从单一重金属风险指数来看，表 5 中所有人群的 4 种重金属 THQ 均小于 1，说明经食用蔬菜途径摄入的 4 种重金属均不具有潜在危害性。而从 THQ 来看，总砷最高，其次是镉，铅居第三，总汞最低，经方差分析，儿童和成人间 THQ 没有显著性差异(P=0.099>0.05)，但不同重金属元素间 THQ 存在极显著差异(P=7.9×10^{-3}<0.01)，由此可见蔬菜中总砷暴露风险明显高于其他 3 种重金属。另外，不同人群 TTHQ 指数均小于 1，表明 4 种重金属的非致癌风险较小，处于安全状态。但是儿童 TTHQ 指数明显高于成人。

从不同种类蔬菜重金属风险指数来看，表 6 中这 6 类蔬菜所有人群的 4 种重金属 THQ 和 TTHQ 均小于 1，说明通过食用蔬菜途径摄入这 4 种重金属的非致癌风险较小，处于安全状态。整体上不同种类蔬菜的 TTHQ 由高到低为绿叶菜类>瓜类>白菜类>葱蒜类>水生蔬菜类>茄果类，因此，食用绿叶菜类蔬菜和瓜类蔬菜的健康风险比食用茄果类蔬菜和水生蔬菜的健康风险大。

表 4　不同蔬菜类别重金属综合污染评价

Table 4　Comprehensive evaluation of heavy metal pollution in different vegetable categories

蔬菜类别	P_i				P_N	分年度 P_N			污染
	总砷	总汞	铅	镉		2022	2023	2024	等级
绿叶菜类	0.03	0.13	0.16	0.13	0.14	0.15	0.21	0.12	安全
白菜类	0.02	0.15	0.15	0.10	0.13	0.10	0.22	0.10	安全
水生蔬菜类	0.02	0.10	0.22	0.05	0.17	0.16	0.31	0.16	安全
葱蒜类	0.02	0.13	0.27	0.29	0.24	0.19	0.28	0.24	安全
瓜类	0.04	0.12	0.27	0.10	0.21	0.16	0.34	0.18	安全
茄果类	0.01	0.12	0.30	0.23	0.24	0.16	0.26	0.27	安全
所有种类	0.02	0.13	0.41*	0.36*	0.33*	0.40*	0.55*	0.27*	安全

注: *表示所有种类评价时铅、镉限量标准以最严限量 0.1 mg/kg、0.05 mg/kg 计。

表 5　不同人群蔬菜膳食暴露及风险指数

Table 5　Dietary exposure and risk index of vegetables in different populations

元素	RfD/[mg/(kg•d)]	EDI/[μg/(kg•d)]		THQ		TTHQ	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
总砷	0.0003	0.062	0.087	0.206	0.290	0.38	0.53
总汞	0.0003	0.006	0.009	0.022	0.031		
铅	0.0036	0.205	0.289	0.057	0.080		
镉	0.0010	0.091	0.129	0.091	0.129		

表 6　不同种类蔬菜不同人群风险指数

Table 6　Risk index for different types of vegetables and populations

蔬菜类别	成人 THQ				成人 TTHQ	儿童 THQ				儿童 TTHQ
	总砷	总汞	铅	镉		总砷	总汞	铅	镉	
绿叶菜类	0.251	0.022	0.068	0.127	0.47	0.354	0.031	0.095	0.127	0.61
白菜类	0.149	0.024	0.063	0.096	0.33	0.210	0.034	0.089	0.096	0.43
水生蔬菜类	0.183	0.018	0.030	0.012	0.24	0.258	0.025	0.043	0.012	0.34
葱蒜类	0.130	0.021	0.037	0.073	0.26	0.183	0.030	0.052	0.073	0.34
瓜类	0.297	0.019	0.037	0.026	0.38	0.418	0.027	0.052	0.026	0.52
茄果类	0.048	0.019	0.041	0.058	0.17	0.067	0.027	0.058	0.058	0.21

3　讨论与结论

3.1　蔬菜中总砷、总汞、铅、镉等重金属含量水平

2022—2024 年上海青浦地产蔬菜中, 总砷、总汞、铅、镉含量中位值分别为 0.0020、0.0010、0.0200、0.0123, 均低于全国蔬菜总砷、总汞、铅、镉中位值(0.030、0.002、0.060、0.020 mg/kg)[20], 整体含量处于较低水平。与上海市其他涉农郊区相比, 总砷、总汞、铅平均值均低于闵行区 2018—2020 年蔬菜总砷、总汞、铅平均值(0.02700、0.00187、0.05000 mg/kg), 镉平均含量略高于闵行(0.011 mg/kg)[13]; 4 种重金属平均值均高于浦东新区 2018—2019 年平均含量(0.011700、0.000478、0.011300、0.012900 mg/kg)[10]。4 种重金属污染特征与其他城市及长三角区域研究结果整体具有良好一致性, 同时呈现区域特征: 检出率结果(镉>总砷>铅>总汞)和重金属富集能力(镉>汞>铅>砷)与湖南省市售蔬菜、东部沿海区域和江苏省[24–26]大体一致。

3.2　不同类别蔬菜对重金属的富集能力

在 6 类蔬菜中, 水生蔬菜类重金属含量处于低水平,

其中铅、镉、总汞含量最低，但总砷含量和检出率相对较高且变化较大，与云南省和苏州市水生蔬菜类砷含量最高，汞含量最低结果一致[27–28]。水生蔬菜砷检出率相对较高，可能与水生蔬菜长期处于水生状态下，与水土接触，土壤有机质含量较高相关[29]。叶菜类蔬菜(绿叶类、白菜类)的重金属含量相对较高，以铅和镉为最高且年度间白菜类镉含量变化最大，可能是叶菜类蔬菜叶片上广泛分布的气孔和叶表面发生蒸腾作用，导致较高的重金属元素转移至叶片[30]；或者是叶类蔬菜通常是矮生植物，其叶片比其他类型的蔬菜离地面更近，易暴露在受污染的土壤中；此外，大气重金属沉降也是叶菜类重金属含量较高的原因之一[31]。而茄果类的重金属含量较低，这与李富荣等[32]研究结果一致，不同蔬菜种类对重金属的吸收富集能力叶菜类>肉质根类>茎类菜>茄果类，但也与研究区茄果的设施化栽培及水肥一体化程度较高有关。瓜类总砷含量最高，这与李瑞琴等[33]研究的结果一致，黄瓜中的总砷含量最高。因此，在农产品质量安全监管上可重点监控地产蔬菜中绿叶菜类、瓜类及水生蔬菜类的总砷及无机砷污染，并采用绿色防控和土壤修复技术减少环境中各种重金属含量[29]。

3.3 地产蔬菜重金属污染等级均处于安全级别，水生蔬菜类和叶菜类蔬菜更为安全

叶菜类蔬菜(绿叶类、白菜类)的重金属含量相对较高，但限量标准也高，因此叶菜类 P_N 为 0.14、0.13，为 6 类蔬菜中最低；水生蔬菜类总砷检出率为各类别最高，但总汞、铅、镉检出率在各类蔬菜中最低，4 种重金属平均含量均低于所有蔬菜样本平均水平，P_N 为 0.17，仅次于叶菜类蔬菜。这表明叶菜类和水生蔬菜类 4 种重金属污染安全等级优于瓜类、茄果类、葱蒜类，其中叶菜类指数最低，与张慧等[34]研究菏泽市售蔬菜、张述敏等[25]研究浙江省蔬菜得出叶菜类重金属 P_N 最低结果相符。

3.4 地产蔬菜对成人和儿童的健康风险

从健康风险评估来看，对于单一重金属元素 THQ 由高到低分别是砷、镉、铅、汞，与孙帅研究结果一致[26]，整体上不同种类蔬菜的 TTHQ 由高到低为绿叶菜类>瓜类>白菜类>葱蒜类>水生蔬菜类>茄果类，总砷是青浦区地产蔬菜重金属的健康风险主要来源，而砷元素 THQ 中以瓜类最高，其次为绿叶菜类，而叶菜类蔬菜中白菜类比绿叶类风险小，食用茄果类和水生蔬菜类健康风险最小。食用同类型蔬菜，儿童的 THQ 和 TTHQ 均高于成人，主要是由于儿童发育不完全，其特殊的生理特征和生活习惯使得他们对重金属毒性更加敏感[35]，而砷及其无机化合物被国家列为 1 类致癌物，本研究只监测了蔬菜总砷含量，未测定无机砷及不同价态砷具体含量，评估总砷时只采用了非致癌性健康风险，基于水生蔬菜总砷含量相对较高，若以 95%比例计算无机砷含量[34]，儿童食用可能存在潜在致癌性健康风险。

参考文献

[1] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822–2833.
Chen Wenxuan, Li Qian, Whang Zhen, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2020, 41(6): 2822–2833.

[2] 王一鸣, 刘丽萍, 张妮娜, 等. 华北平原某地区农产品重金属含量及膳食摄入风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 66–75.
Wang Yiming, Liu Liping, Zhang Nina, et al. Risk assessment of heavy metal content and dietary intake of agriculturalproducts in a region of the North China Plain [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 66–75.

[3] 毕书海, 魏昕, 高琪, 等. 宁夏西吉县表层土壤重金属生态安全风险与健康评价[J]. 中国地质, 2025(10): 1–18.
BI Shuhai, Wei Xin, Gao Qi, et al. Ecological safety risk and health assessment of heavy metals in surface soil of Xiji County, Ningxia [J]. Geology in China, 2025(10): 1–18.

[4] 高四海, 蔡圆园, 刘倩倩, 等. 温州市本地大米重金属镉污染空间分布及人群膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(9): 1333–1339.
Gao Sihai, Cai Yuanyuan, Liu Qianqian, et al. Spatial distribution of cadmium pollution in locally produced rice and human exposure risk assessment in Wenzhou City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(9): 1333–1339.

[5] 李春芳. 重金属铅污染及防治对策分析[J]. 山西化工, 2024(6): 262–264.
LI Chunfang, Analysis of heavy metal lead pollution and prevention and control measures [J]. Shanxi Chemical Industry, 2024(6): 262–264.

[6] 陶宏, 王坚, 陈文佳. 青浦区耕地土壤重金属含量状况及变化趋势分析[J]. 上海农业科技, 2023(1): 97–99.
Tao Hong, Wang Jian, Chen Wenjia. Analysis of heavy metal content and its variation trend in cultivated land soils of Qingpu District [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2023(1): 97–99.

[7] 吴君兰, 黄芹花. 闵行区耕地土壤重金属污染现状调查分析[J]. 上海农业科技, 2023(4): 21–24, 62.
Wu Junlan, Huang Qinhua. Investigation and analysis of heavy metal pollution status in cultivated land soils of Minhang District [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2023(4): 21–24, 62.

[8] 袁大伟, 何七勇, 郑宪清, 等. 上海松江区蔬菜田土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 上海农业学报, 2013, 29(4): 42–46.
Yuan Dawei, He Qiyong, Zhen Xianqing, et al. The heavy metal content and ecological riskwarning assessment of vegetable soils in Songjiang District of Shanghai [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2013, 29(4): 42–46.

[9] 倪玮怡. 上海市郊土壤-蔬菜系统中重金属来源及贡献研究[D]. 上海:

华东师范大学, 2016: 43-44.
Ni Weiyi. The sources and contribution research ofheavy metals in soil-vegetable system atsuburban areas in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016: 43-44.

[10] 陈亦, 石晓旭. 上海市浦东新区地产蔬菜重金属含量分析[J]. 现代农业科技, 2020(2): 210–211.
Chen Yi, Shi Xiaoxu. Analysis of heavy metal contents in locally produced vegetables in Pudong New Area, Shanghai [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(2): 210–211.

[11] 马莉, 陆春胜, 王思佳, 等. 崇明区食用农产品重金属污染状况及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4226–4230.
Ma Li, Lu Chunsheng, Wang Sijia, et al. Heavy metal pollutions and health risk assessment of edible agricultural products in Chongming distric [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(13): 4226–4230.

[12] 徐映如, 陈道湧, 沈俊毅, 等. 虹口区市售蔬菜重金属污染与健康风险评估[J]. 预防医学, 2021, 33(4): 406–410.
Xu Yingru, Chen Daoyong, Shen Junyi, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of commercially available vegetables in Hongkou District [J]. Preventive Medicine, 2021, 33(4): 406–410.

[13] 孙灿, 吴君兰, 姚烨华, 等. 闵行区地产蔬菜中重金属含量的调查研究及安全性评价[J]. 上海农业科技, 2018(2): 23–26.
Sun Can, Wu Junlan, YaoYehua, et al. Investigation and safety evaluation of heavy metal contents in locally produced vegetables in Minhang District [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2018(2): 23–26.

[14] 袁文悦. 上海城郊土壤及蔬菜重金属污染情况研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 11.
Yuan Wenyue, Study on heavy metals pollution in soil and vegetables in suberbs of Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017: 11.

[15] 黄艳桃, 陈清德, 覃梦琳, 等. 2017—2019 年广西某市大米及稻谷的重金属污染调查[J]. 职业与健康, 2020, 36(16): 2210–2213.
Huang Yantao, Chen Qingde, Qin Menglin, et al. Investigation on heavy metal contamination of rice and unhusked rice in a city of Guangxi from 2017—2019 [J]. Occupation and Health, 2020, 36(16): 2210–2213.

[16] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1076–1085.
Li Ruzhong, Pan Chengrong, Xu Jingjing, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2013, 34(3): 1076–1085.

[17] 陈羽烨, 黄婵婵, 梨冬桂, 等. 广西主要特色蔬菜中的重金属含量特征及风险评价[J]. 中国蔬菜, 2025(8): 13–19.
Chen Yuye, Huang Chanchan, Li Donggui, et al. Content characteristics and risk assessment of heavy metals in main characteristic vegetables in Guangxi [J]. China Vegetables, 2025(8): 13–19.

[18] 魏军晓, 耿元波, 岑况. 北京市售大米重金属含量监测及膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 267–273.
Wei Junxiao, Geng Yuanbo, Cen Kuang, The geavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in Beijing [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(6): 267–273.

[19] 施姜丹, 史克欣, 黄雨佳, 等. 中国大米和蔬菜重金属/类金属污染及其健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 479–487.
Shi Jiangdan, Shi Kexin, Huang Yujia, et al. Heavy metal and metalloid contamination of rice and vegetables and their health risk in China SHI [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(7): 479–487.

[20] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2359–2370.
Feng Ying, Ma Luyao, Wang Qiong, et al. Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2359–2370.

[21] 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.

[22] 王丽娟. 粮食中重金属铅污染的现状及对人体的危害[J]. 河南科技, 2024, 10(4): 148–149.
Wang Lijuan. Current situation of heavy metal lead pollution in grain and its harm to human body [J]. Henan Science and Technology, 2024, 10(4): 148–149.

[23] 孙娟. 重金属铅污染土壤治理修复的最新研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(9): 129–131.
Sun Juan. The latest research progress of heavy metal lead-contaminated soil control and remediation [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(9): 129–131.

[24] 向俊, 唐万里, 戴璇, 等. 湖南省市售蔬菜中重金属污染特征及风险评估[J], 食品安全质量检测学报, 2025, 18(16): 19–25.
Xiang Jun, Tang Wanli, Dai Xuan, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in vegetables sold in Hunan Province [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2025, 18(16): 19–25.

[25] 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 等. 浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险[J]. 环境科学, 2023, 44(07): 4151–4161.
Zhang Shumin, Liu Cuiling, Yang Guiling, et al. Ecological risk and health risk of heavy metal pollution in vegetable production system of Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2023, 44(07): 4151–4161.

[26] 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 等. 我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5519–5525.
Sun Shuai, Geng Ningbo, Guo Cuicui, et al. Accumulation characteristics and dietary exposure estimation of feavy metals in vegetables from the eastern coastal region of China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2021, 42(11): 5519–5525.

[27] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娴, 等. 2016-2018 年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 648–654.
Huang Feifei, Zhang Ning, Zhao Mixian, et nal. Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou

from 2016 to 2018 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(2): 648–654.

[28] 张萌, 张银烽, 赵晓慧, 等. 云南省水生蔬菜中 5 中典型重金属含量特征及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3710–3718.
Zhang Meng, Zhang Yinfeng, Zhao Xiaohui, et al. Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3710–3718.

[29] 张爱玲, 杨丽娟, 孙尉豪, 等. 几种蔬菜中砷含量及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(19): 10100–10102
Zhang Ailing, Yang Lijuan, Sun Weihao, et al. Arsenic content in several vegetables and its influencing factors [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(19): 10100–10102.

[30] Zhou Hang, Zeng Min, Zhou Xin, et al. Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulationin soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan Province, China [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, 32(12): 2719–2727.

[31] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: a case study in Varanasi [J]. Environmental Pollution, 2008, 154(2): 254–263.

[32] 李富荣, 李敏, 杜应琼, 等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(1): 52–58.
Li Furong, Li Min, Du Yingqiong, et al. Study on uptake, accumulation and safety threshold of heavy metals in soil by solanaceous vegetables [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018(1): 52–58.

[33] 李瑞琴, 于安芬, 许文艳, 等. 戈壁设施蔬菜重金属污染特征及健康风险评估[J]. 中国食物与营养, 2022, 28(9): 73–78.
Li Ruiqin, Yu Anfen, Xu Wenyan, et al. Pollution characteristics and dietary intake risk assessment of heavy metals in facilities vegetables in gobi [J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(9): 73–78.

[34] 张慧, 张翠霞, 张惠珠, 等. 2017—2021 年菏泽市售蔬菜中铅、镉污染状况及健康风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(24): 3058–3066.
Zhang Hui, Zhang Cuixia, Zhang Huizhu, et al. Pollution status and health risk assessment of lead and cadmium in market vegetables in Heze city from 2017 to 2021 [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(24): 3058–3066.

[35] 武瑞婷. 2016—2022 年石家庄市农田土壤重金属污染变化及健康风险评估[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2024: 70.
Wu Ruiting. Changes and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in Shijiazhuang city from 2016 to 2022 [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2024: 70.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)