

基于Monte-Carlo模拟对辽宁高粱镉、铬的健康风险评估

彭天舒, 吴限鑫*, 李丽娜, 林秋君, 郭春景, 王建忠

(辽宁省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(沈阳), 辽宁沈阳 110161)

摘要: 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定辽宁省五个地区49份高粱样品中Cd、Cr含量, 基于蒙特卡罗(Monte-Carlo)模拟评估高粱的非致癌风险指数(HQ)、综合非致癌风险指数(HI)、致癌风险指数(CR)和综合致癌风险指数(TCR), 并对存在的健康风险进行消费引导。辽宁五个地区49份高粱样品中Cd、Cr含量范围分别为0.002~0.056 mg/kg、0.116~0.782 mg/kg; 五个地区高粱对成人的HQ和HI均小于1, CR和TCR均小于 1×10^{-4} ; 五个地区高粱对儿童的HQ和HI均小于1, CR小于 1×10^{-4} , 双塔、铁岭地区的TCR小于 1×10^{-4} , 但沈河、建平、阜蒙地区的TCR分别为 1.04×10^{-4} 、 1.16×10^{-4} 、 1.06×10^{-4} , 略大于 1×10^{-4} 。辽宁省五个地区高粱样品的整体污染情况较轻, Cd、Cr含量均符合国家标准; 五个地区高粱对成人的HQ、HI、CR和TCR均处于安全水平; 五个地区高粱对儿童的HQ、HI和CR均处于安全水平, 只有沈河、建平、阜蒙三个地区存在较低的综合致癌风险, 但当沈河、建平、阜蒙三个地区暴露频率分别控制在58、52、57 d/a以下时, 可规避综合致癌风险。

关键词: 高粱; 重金属; 健康风险评估; Monte-Carlo 模拟

文章编号: 1673-9078(2025)08-316-325

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0818

Health Risk Assessment of Cadmium and Chromium in Sorghum from Liaoning based on Monte Carlo Simulation

PENG Tianshu, WU Xianxin*, LI Lina, LIN Qiujun, GUO Chunjing, WANG Jianzhong

(1.Risk Assessment Laboratory for Agricultural Products Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110161, China) (2.Institute of Agricultural Quality and Testing Technology, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: The Cd and Cr contents of 49 sorghum samples from five regions of Liaoning Province were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Based on Monte Carlo simulation, the non-carcinogenic risk index (HQ), total non-carcinogenic risk index (HI), carcinogenic risk index (CR), and total carcinogenic risk index (TCR)

引文格式:

彭天舒, 吴限鑫, 李丽娜, 等. 基于Monte-Carlo模拟对辽宁高粱镉、铬的健康风险评估[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 316-325.

PENG Tianshu, WU Xianxin, LI Lina, et al. Health risk assessment of cadmium and chromium in sorghum from liaoning based on monte carlo simulation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 316-325.

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 辽宁省农业科学院质标所基金项目(ZBSJJ2022-001); 辽宁省农业科学院院长基金项目(2024BS1003); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2024-BS-293)

作者简介: 彭天舒(1991-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: tspenglaas@163.com

通讯作者: 吴限鑫(1990-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: wuxianxin1225@163.com

of the sorghum samples were evaluated, and guidelines for consumption were provided considering the existing health risks. The Cd and Cr content of the sorghum samples from five regions in Liaoning were in the range of 0.002~0.056 and 0.116~0.782 mg/kg, respectively. For adults, the HQ and HI of sorghum from the five regions were less than 1, whereas the CR and TCR were less than 1×10^{-4} . For children, the HQ and HI of sorghum from the five regions were less than 1, whereas the CR was less than 1×10^{-4} , with the TCR of sorghum from the Shuangta and Tieling regions being less than 1×10^{-4} . However, the TCR for sorghum from the Shenhe, Jianping, and Fumeng regions was 1.04×10^{-4} , 1.16×10^{-4} , and 1.06×10^{-4} , respectively, where the values are slightly larger than 1×10^{-4} . The overall degree of pollution of sorghum samples from the five regions in Liaoning Province was low, with the Cd and Cr levels meeting national standards. The HQ, HI, CR, and TCR of sorghum for adults were at safe levels for all five regions. The HQ, HI, and CR of sorghum from all five regions were at safe levels for children, with only the Shenhe, Jianping, and Fumeng regions having a lower total carcinogenic risk for children. However, the total carcinogenic risk could be minimized when the frequency of exposure in Shenhe, Jianping, and Fumeng was controlled to less than 58, 52, and 57 d/a, respectively.

Key words: sorghum; heavy metal; health risk assessment; Monte Carlo simulation

高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], 又称蜀黍、芦粟、红粱等^[1], 原产于非洲, 从印度传入中国, 是世界上最古老的禾谷类作物之一^[2]。高粱是全球第五大粮食作物^[3], 也是中国重要的杂粮作物^[4], 具有较强的抗逆特性和广泛的适应能力, 在中国多个省份都有种植规模^[5,6]。高粱用途广泛, 可直接食用或作为食品原料^[7]、饲料原料^[8]、酿酒原料等^[9]进行生产活动, 应用前景广阔, 营养价值丰富。

随着工业发展、生活污染等对土壤、水质的影响, 区域内作物的安全性也令人担忧。镉 (Cd)、铬 (Cr) 是常见的重金属污染物, 在环境中广泛分布并且能够持续存在^[10-13], 可通过食物链在人体蓄积, 危害人体系统和器官, 诱发癌症^[14-17]。国际上通过健康风险评估模型评估食品中重金属元素对人体的危害: 聂梅梅等^[18]对江苏不同产地莲藕中重金属含量进行了健康风险评估, 结果表明, 莲藕样品中重金属含量均在限量标准范围内, 莲藕中重金属对儿童造成的健康危害比成年人高; Wang 等^[19]评价了中国大闸蟹体内重金属含量对人体的健康风险, 结果表明, 中国大闸蟹的每日摄入量不构成高风险, 雌性蟹肉的饮食风险高于雄性; Kamaly 等^[20]评估了埃及不同品牌鸡肉和肝脏样品中的重金属健康风险, 其 Pb、Fe、Cd 分别以不同的程度超过埃及标准化组织及世界卫生组织的最大允许限量, 虽然健康风险可忽略, 但为了食用安全, 仍需要对家禽产品和副产品进行重金属监测。传统的健康风险评估模型采用固定的暴露参数, 评估结果可能会偏高或者偏低, 而蒙特卡罗模拟方法可以更好地反映风险分布的真实情况^[21]。蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模

拟方法是一种概率评估法, 通过对风险变量的随机抽样模拟计算风险概率分布, 在系统科学、信息学、物理学、环境科学、金融工程学、生物医学、食品安全等各领域广泛应用^[22-28]。

辽宁省位于我国东北地区南部, 温带季风气候, 四季分明, 是我国粮食主产区之一, 也是我国高粱的主产区之一。高粱能够保护心血管、调节血糖, 日益受到消费者追捧。然而, 环境的重金属污染可能会导致高粱的重金属污染, 影响高粱及其产品的质量安全, 损害人体健康, 但目前对高粱的研究主要集中在品种选育、病虫害防控、营养功能、品质加工等方面, 对高粱质量安全相关研究鲜有报道。随着消费观念的升级和消费结构的转型, 人们越来越重视食品安全, 高质量、健康安全的食品才是消费者的最终诉求。因此, 开展高粱产地环境质量安全评价和高粱中有害污染物残留评价及健康风险评估的研究具有一定现实意义。为了解辽宁省不同产地高粱重金属 Cd 和 Cr 污染情况, 本文选取辽宁省境内沈阳市、朝阳市、阜新市、铁岭市的高粱主产区基地, 共计采集 49 份高粱样品, 采用电感耦合等离子体质谱仪对高粱样品中 Cd 和 Cr 的含量进行分析, 基于蒙特卡罗模拟方法, 利用美国环保署 (USEPA) 健康风险评估模型中的非致癌风险指数 (HQ)、综合非致癌风险指数 (HI)、致癌风险指数 (CR) 和综合致癌风险指数 (TCR) 进行高粱重金属健康风险评估, 以期对辽宁地区高粱产品的质量安全和人体健康提供基础依据, 并为辽宁省高粱产业的绿色可持续发展提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据辽宁省高粱产地和产量分布特点,于2023年1~9月采集辽宁省高粱产区沈阳市沈河区(以下简称沈河地区)样品9份、朝阳市建平地区(以下简称建平地区)样品9份、朝阳市双塔区(以下简称双塔地区)样品10份、阜新市阜新蒙古族自治县(以下简称阜蒙地区)样品9份、铁岭市铁岭县(以下简称铁岭地区)样品12份,五个地区共计采集高粱样品49份。以五点法进行取样并混合均匀,每份样品不低于2 kg,装入尼龙丝网袋中。采集后的高粱样品统一去除外壳,晾干后用粉碎机粉碎,每份样品分成2份,1份留存,另1份备用。采样点分布见图1。

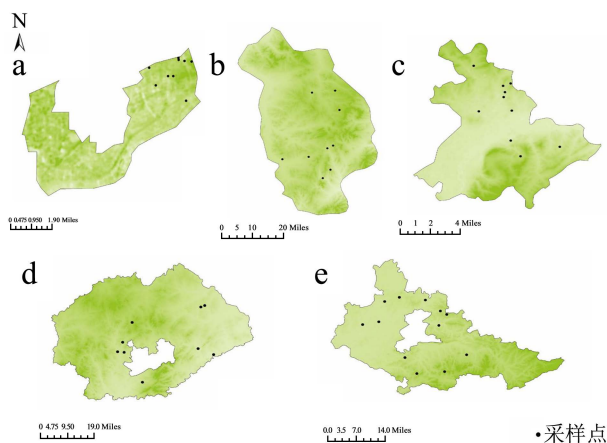


图1 辽宁省不同地区高粱采样分布点

Fig.1 Distribution points of sorghum from different regions in Liaoning Province

注:(a)为沈河地区;(b)为建平地区;(c)为双塔地区;(d)为阜蒙地区;(e)为铁岭地区。

1.2 仪器与试剂

MG-100 组织研磨仪,北京格瑞德曼仪器设备有限公司;ME204 电子天平,梅特勒-托利多集团;EHD36-iTouch 电热消解仪,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪,美国安捷伦科技有限公司。

Cd、Cr 单元素标准溶液(1 000 $\mu\text{g/mL}$),购自国家有色金属及电子材料分析测试中心;含 Ce、Co、Li、Mg、Tl、Y 的调谐液(1 $\mu\text{g/L}$)和含 Bi、Ge、In、Li、Lu、Rh、Sc、Tb 的内标溶液(100 $\mu\text{g/mL}$),

购自美国安捷伦科技有限公司;硝酸(优级纯),购自上海安谱实验科技股份有限公司;氢氟酸(优级纯)和高氯酸(优级纯),购自国药集团化学试剂有限公司;实验用水符合 GB/T 6682-2008《分析实验室用水规格和试验方法》的规定。

1.3 试验方法

1.3.1 样品前处理

称取过100目筛的样品0.25 g(精确至0.000 1 g)于50 mL 聚四氟乙烯消解管内,加入5 mL 硝酸、4 mL 氢氟酸及2 mL 高氯酸,拧上螺旋盖,常温下静置12~24 h。次日将聚四氟乙烯消解管放置在全自动电热消解仪上,采用梯度升温方式进行消解,升温条件为:110 $^{\circ}\text{C}$ (60 min)、升至160 $^{\circ}\text{C}$ (90 min)、继续升至200 $^{\circ}\text{C}$ 。当消化液呈无色透明状时,赶酸至1 mL 左右,冷却后定容至25.0 mL,混匀备用,同时做空白对照样。每个高粱样品制备三个平行样。

1.3.2 仪器工作条件

仪器提前一天抽真空,使用2.0 L/min 氦气吹扫过夜,次日仪器开机预热,使用调谐液进行仪器状态调谐,达到最佳工作条件。射频功率:1 550 W;等离子体气体流量:15.0 L/min;雾化气流量:0.65 L/min;补偿气流量:0.35 L/min;辅助气体流量:0.90 L/min;采样深度:10.0 mm;雾化室温度:2 $^{\circ}\text{C}$;蠕动泵转速:0.10 r/s;样品引入速度:0.30 rad/s;样品引入时间:30 s;重复次数:3次;氧化物(156/140):0.308%;双电荷(70/140):1.067%。

1.3.3 高粱Cd、Cr含量分析

参考国家标准 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[29],采用电感耦合等离子体质谱法分析高粱样品中Cd、Cr的含量,Cd元素选择Rh¹⁰³为内标元素,Cr元素选择Sc⁴⁵为内标元素。

1.3.4 质量控制

小米粉成分分析标准物质 GBW10189,Cr 标准值0.157 mg/kg,不确定度0.025,购自坛墨质检科技有限公司;小麦粉成分分析标准物质 GBW(E)100496,Cd 标准值0.10 mg/kg,不确定度0.01,购自钢研纳克检测技术股份有限公司。

1.4 评估方法

1.4.1 重金属限量判定

以 GB 2762-2022《食品安全国家标准食品中污染物限量》中 Cd、Cr 的限量要求作为判定依据，其中 Cd 的限量值为 0.1 mg/kg、Cr 的限量值为 1.0 mg/kg^[30]。

1.4.2 Monte-Carlo健康风险评估

本研究使用的健康风险评估方法参考美国环境保护署（USEPA）提出的健康风险评估模型^[31]，采用非致癌风险指数（HQ）、综合非致癌风险指数（HI）、致癌风险指数（CR）和综合致癌风险指数（TCR）评估辽宁省五个地区高粱中重金属引起的人体健康非致癌风险与致癌风险。其计算公式如下：

$$HQ = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD}$$
 (1)

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ$$
 (2)

$$CR = \frac{C \times IR \times EF \times ED \times SF}{BW \times AT}$$
 (3)

$$TCR = \sum_{i=1}^n CR$$
 (4)

使用 Oracle Crystal Ball 软件确定变量的分布函数并进行 Monte-Carlo 模拟，设置迭代次数为 10 000 次、置信度为 95%，式中参数含义及 Monte-Carlo 健康风险模型的相关参数见表 1。当 HQ 或 HI < 1，表示摄入某种或某几种重金属非致

癌风险可以忽略；当 HQ 或 HI ≥ 1，表示存在非致癌风险；HQ 或 HI 数值越大，非致癌风险越高。当 CR 或 TCR < 1×10⁻⁶，表示致癌风险可以忽略；当 1×10⁻⁶ < CR 或 TCR < 1×10⁻⁴，表示致癌风险在可以接受范围之内；当 CR 或 TCR > 1×10⁻⁴，表示致癌风险较大；CR 或 TCR 数值越大，致癌风险越高。

1.5 数据统计与分析

采用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件对数据进行统计学描述和分析，P < 0.05 为差异性有统计学意义；采用 ArcGIS 10.8 软件制作不同地区 Cd、Cr 含量分布图，应用自然间断点分级法对不同地区高粱 Cd、Cr 含量进行分类；采用 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4 软件进行 Monte-Carlo 模拟；采用 Origin 2022 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 高粱重金属含量分析

对 49 份高粱样品的 Cd、Cr 含量进行分析，结果见表 2。由表 2 可知，49 份高粱样品中 Cd、Cr 均有检出，检出率为 100.0%。其中 Cd 含量范围在 0.002~0.056 mg/kg 之间，平均含量为 0.017 mg/kg，中位值为 0.009 mg/kg；Cr 含量范围在 0.116~0.782 mg/kg 之间，平均含量为 0.311 mg/kg，中位值为 0.241 mg/kg。

表 1 基于Monte-Carlo模拟的重金属健康风险暴露参数
Table 1 Health risk exposure parameters for heavy metals based on Monte Carlo simulation

参数	含义	取值	点位分布	数据来源
C/(mg/kg)	高粱重金属浓度（毫克 / 千克）	实测值	正态 / 对数正态	—
IR/(kg/d)	人均每日高粱摄入量（千克 / 天）	成人（0.05、0.10、0.15） 儿童（0.03、0.05、0.10）	三角分布	[32]
EF/(d/a)	暴露频率（天 / 年）	60	单点	[34,35]
ED/a	暴露时间（年）	成人（70） / 儿童（9）	单点	[34,35]
BW/kg	平均体质量（千克）	成人（55.5, 60.7, 66.0） 儿童（26.5, 31.0, 35.5）	三角分布	[32,33]
AT/d	平均接触时间（天）	成人（25 550） / 儿童（32 850）	单点	[32,33]
RfD/[mg/(kg·d)]	每日摄入参考计量（每天每千克体质量摄入量）	Cd（1 × 10 ⁻³ ） / Cr（3 × 10 ⁻³ ）	单点	[36-40]
SF/[mg/(kg·d)]	致癌斜率系数（每天每千克体质量摄入量）	Cd（6.1） / Cr（0.5）	单点	[36-40]

表 2 高粱中Cd、Cr的含量
Table 2 Content of Cd and Cr in sorghum

重金属	样品数量/份	平均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	检出率/%
Cd	49	0.017±0.017	0.009	0.002	0.056	100.0
Cr	49	0.311±0.178	0.241	0.116	0.782	100.0

表 3 辽宁省不同地区高粱中Cd、Cr的含量
Table 3 Content of Cd and Cr in sorghum from different regions of Liaoning Province

产地	样品数量 /份	Cd/(mg/kg)			Cr/(mg/kg)		
		含量范围	平均值	中位值	含量范围	平均值	中位值
沈河地区	9	0.013~0.056	0.032±0.018 ^a	0.021	0.157~0.540	0.263±0.115 ^a	0.230
建平地区	9	0.024~0.056	0.037±0.01 ^{3a}	0.031	0.150~0.619	0.270±0.142 ^a	0.230
双塔地区	10	0.003~0.006	0.004±0.001 ^b	0.004	0.201~0.339	0.254±0.052 ^a	0.234
阜蒙地区	9	0.006~0.012	0.008±0.002 ^b	0.008	0.276~0.782	0.558±0.171 ^b	0.504
铁岭地区	12	0.002~0.028	0.008±0.007 ^b	0.006	0.116~0.625	0.242±0.170 ^a	0.155

注：同列不同字母表示差异达到显著水平（ $P<0.05$ ）。

2.2 高粱重金属含量地区差异性分析

五个地区高粱样品的 Cd、Cr 含量均存在差异（ $P<0.05$ ），分析结果见表 3。从 Cd 含量来看，沈河、建平两个地区之间无差异，双塔、阜蒙、铁岭三个地区之间无差异，沈河、建平分别与双塔、阜蒙、铁岭存在差异，双塔地区的含量显著低于沈河、建平地区，平均值为 0.004 mg/kg；从 Cr 含量来看，阜蒙地区与其他四个地区之间存在差异，显著高于其他四个地区，平均值为 0.558 mg/kg，其他四个地区之间无差异。

根据五个地区高粱样品 Cd 含量的中位值来看，建平地区、沈河地区含量较高，分别为 0.031、0.021 mg/kg，阜蒙地区、铁岭地区含量中等，分别为 0.008、0.006 mg/kg，双塔地区含量较低，为 0.004 mg/kg，具体分布如图 2a 所示；根据五个地区高粱样品 Cr 含量的中位值来看，阜蒙地区含量较高，为 0.504 mg/kg，沈河地区、建平地区、双塔地区含量中等，分别为 0.230、0.230、0.234 mg/kg，铁岭地区含量较低，为 0.155 mg/kg，具体分布如图 2b 所示。

根据五个地区高粱样品 Cd、Cr 含量的平均值和中位值分别进行重金属 Cd-Cr 清洁程度秩和比综合评价，结果如表 4 所示。以平均值作为评价标准，五个地区的综合排名由高到低依次为铁岭地区 = 双塔地区 > 沈河地区 > 阜蒙地区 > 建平地区；以中位值作为评价标准，五个地区的综合排名由高到低依次为铁岭地区 > 双塔地区 > 沈河地区 > 阜蒙地区 = 建平地区；不同地区高粱样品中 Cd、Cr 含量差异

可能与生产地区的环境及土壤有关，虽然高粱样品不存在 Cd、Cr 含量超标的情况，但仍有部分样品含量较高，且 49 份高粱样品的 Cd、Cr 检出率为 100.0%，因此有必要进行健康风险评估。

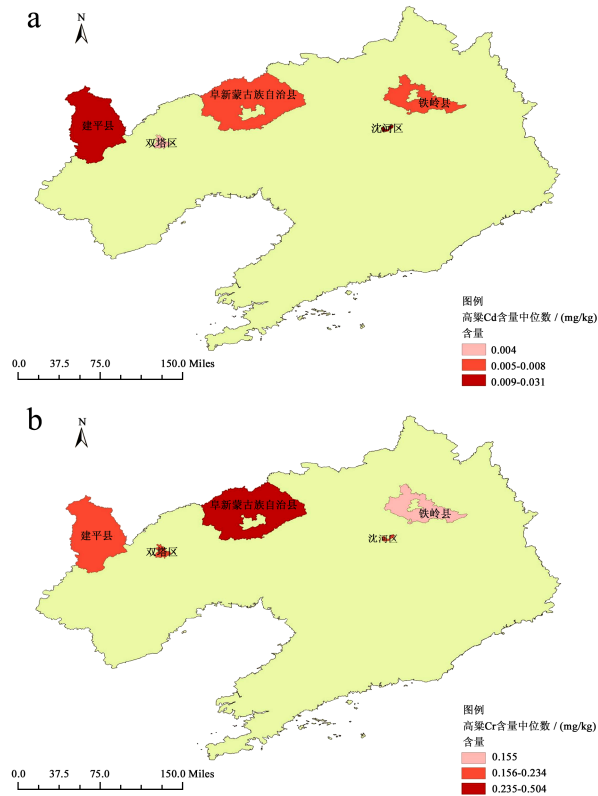


图 2 辽宁省不同地区高粱 Cd、Cr 含量分布图
Fig.2 Distribution map of cadmium and chromium content in sorghum in different regions of Liaoning Province
注：(a) 为高粱 Cd 含量分布；(b) 为高粱 Cr 含量分布。

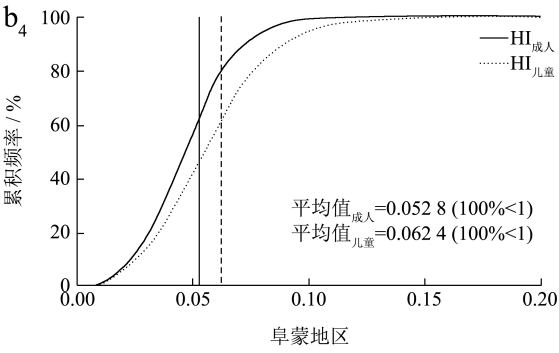
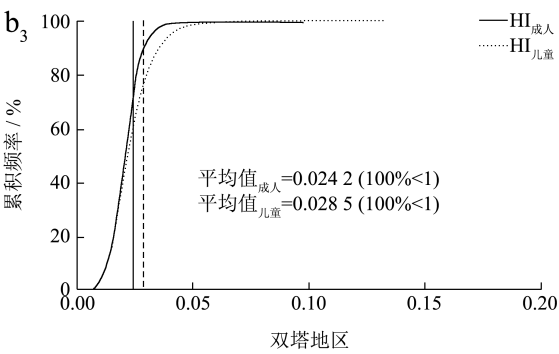
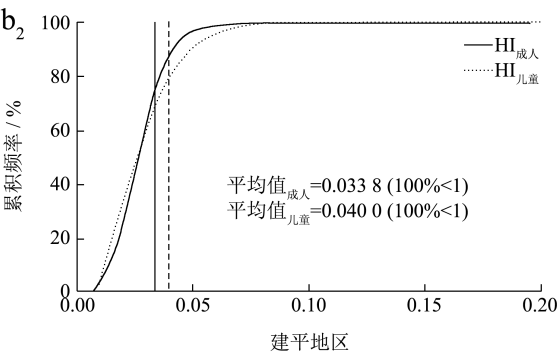
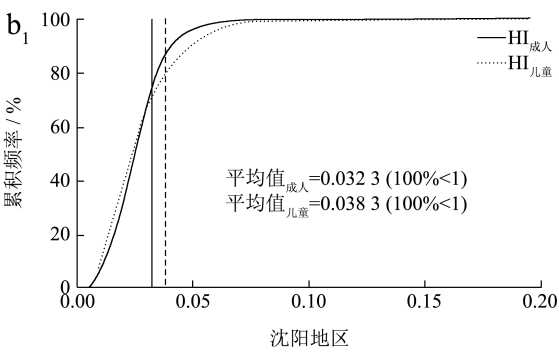
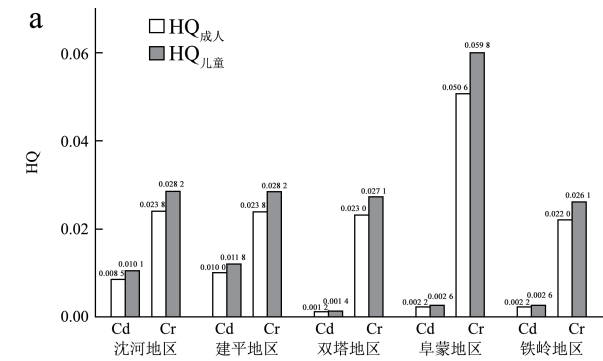
表 4 辽宁省不同地区高粱重金属含量综合评价

产地	平均值				中位值			
	Cd 含量 (秩)	Cr 含量 (秩)	RSR 值	RSR 排名	Cd 含量 (秩)	Cr 含量 (秩)	RSR 值	RSR 排名
沈河地区	2.0	3.0	0.500	3	2.0	4.0	0.600	3
建平地区	1.0	2.0	0.300	5	1.0	3.0	0.400	4
双塔地区	5.0	4.0	0.900	1	5.0	2.0	0.700	2
阜蒙地区	3.0	1.0	0.400	4	3.0	1.0	0.400	4
铁岭地区	4.0	5.0	0.900	1	4.0	5.0	0.900	1

2.3 高粱重金属健康风险评估

2.3.1 高粱重金属非致癌风险评估

基于 Monte-Carlo 模拟高粱重金属 Cd、Cr 经口摄入后的非致癌风险，评估结果如图 3a 所示，双塔地区高粱样品中 Cd、铁岭地区高粱样品中 Cr 对成人和儿童的 HQ 是五个地区中最低的，分别是 0.001 2、0.001 4 和 0.022 0、0.026 1；建平地区高粱样品中 Cd、阜蒙地区高粱样品中 Cr 对成人和儿童的 HQ 是五个地区中最高的，分别是 0.010 0、0.011 8 和 0.050 6、0.059 8；五个地区高粱样品中 Cd、Cr 对成人和儿童的非致癌风险指数（HQ）均远小于 1，不存在非致癌风险。五个地区成人及儿童高粱重金属综合非致癌风险指数（HI）10 000 次模拟值的累积概率分布情况如图 3b 所示，双塔、铁岭地区高粱重金属对成人的综合非致癌风险指数最低，均为 0.024 2，双塔地区高粱重金属对儿童综合非致癌风险指数最低，为 0.028 5，阜蒙地区高粱重金属对成人和儿童的综合非致癌风险指数最高，分别为 0.052 8、0.062 4；五个地区成人及儿童的 HI 均远小于 1，不存在综合非致癌风险。不同地区高粱的 Cd、Cr 对成人及儿童的非致癌风险贡献率如图 3c 所示，五个地区 Cd、Cr 的非致癌风险贡献均为 Cr>Cd，其中双塔、阜蒙、铁岭三个地区的 Cr 贡献率远远高于 Cd，三个地区 Cr 对成人及儿童的非致癌风险贡献率均达到 98% 以上。



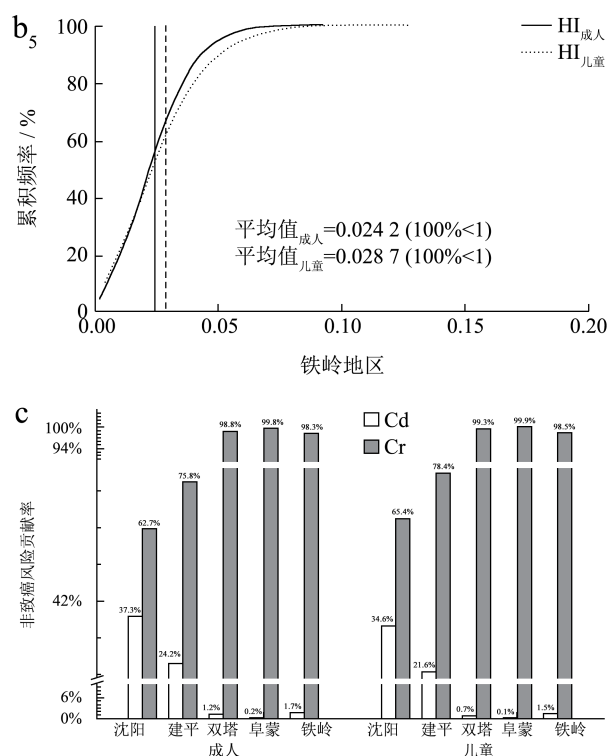


图3 高粱重金属非致癌风险评价

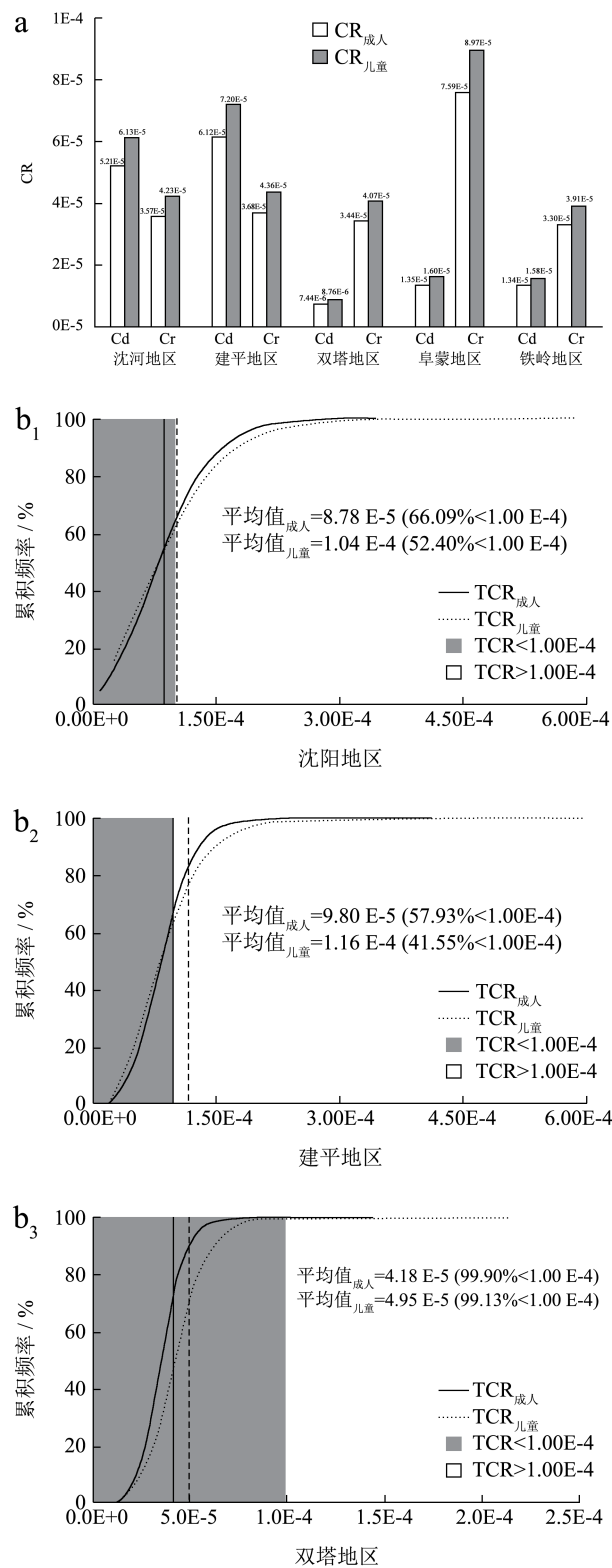
Fig.3 Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals in sorghum

注: (a) 和 (b) 为高粱重金属非致癌风险评价; (c) 为重金属对非致癌风险指数的贡献率。

2.3.2 高粱重金属致癌风险评估

基于 Monte-Carlo 模拟高粱重金属 Cd、Cr 经口摄入后的致癌风险, 评估结果如图 4a 所示, 其中双塔地区高粱样品中 Cd、铁岭地区高粱样品中 Cr 对成人和儿童的 CR 是五个地区中最低的, 分别为 7.44×10^{-6} 、 8.76×10^{-6} 和 3.30×10^{-5} 、 3.91×10^{-5} ; 建平地区高粱样品中 Cd、阜蒙地区高粱样品中 Cr 对成人和儿童的 CR 是五个地区中最高的, 分别为 6.12×10^{-5} 、 7.20×10^{-5} 和 7.59×10^{-5} 、 8.97×10^{-5} ; 五个地区高粱样品中 Cd、Cr 对成人和儿童的致癌风险指数 (CR) 均小于 1×10^{-4} , 致癌风险介于可接受范围之内。五个地区成人及儿童高粱重金属综合致癌风险指数 (TCR) 的 10 000 次模拟值的累积概率分布情况如图 4b 所示, 双塔地区高粱重金属对成人和儿童的综合致癌风险指数最低, 分别为 4.18×10^{-5} 、 4.95×10^{-5} , 建平地区高粱重金属对成人和儿童的综合致癌风险指数最高, 分别为 9.80×10^{-5} 、 1.16×10^{-4} ; 五个地区高粱重金属对成人的 TCR 均小于 1×10^{-4} , 致癌风险介于可接受范围之内, 沈阳、建平、阜蒙三个地区高粱重金属对儿童的 TCR

分别为 1.04×10^{-4} 、 1.16×10^{-4} 、 1.06×10^{-4} , 略大于 1×10^{-4} , 存在一定的综合致癌风险。不同地区高粱的 Cd、Cr 对成人及儿童的致癌风险贡献率如图 4c 所示, 沈阳、建平地区 Cd、Cr 的致癌风险贡献均为 Cd > Cr, 双塔、阜蒙、铁岭地区 Cd、Cr 的致癌风险贡献均为 Cr > Cd。



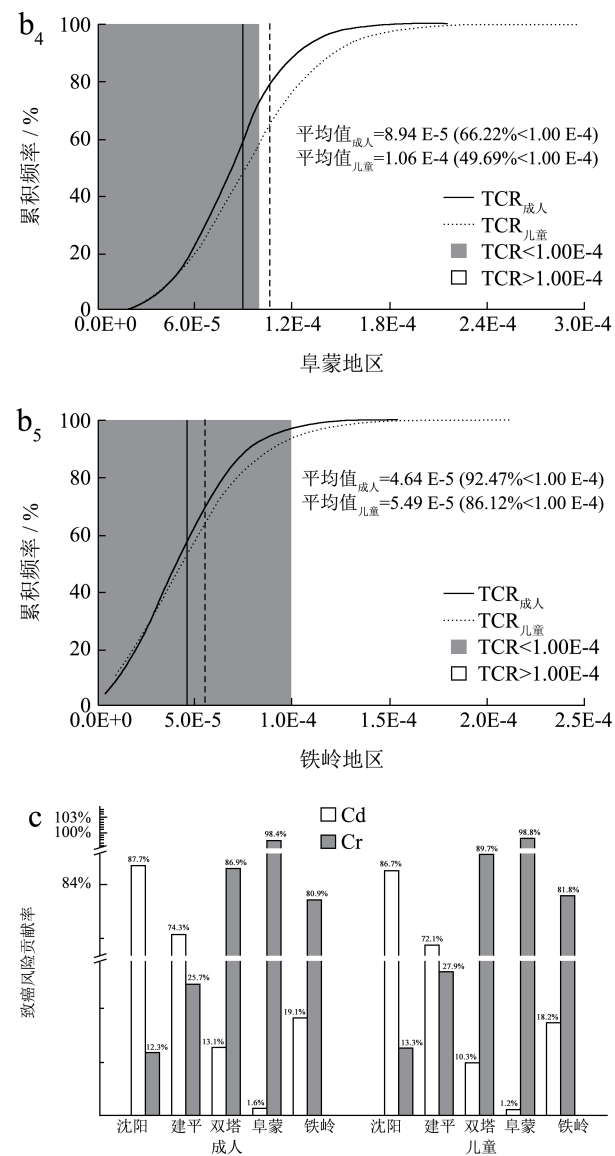


图 4 高粱重金属致癌风险评价

Fig.4 Carcinogenic risk assessment of heavy metals in sorghum

注：(a) 和 (b) 为高粱重金属致癌风险评价；(c) 为重金属对致癌风险指数的贡献率。

2.3.3 辽宁不同地区高粱消费引导建议

根据辽宁五个地区高粱重金属非致癌风险和致癌风险的评估结果，沈阳、建平、阜蒙三个地区高粱重金属对儿童的 TCR 大于 1×10^{-4} ，存在一定的致癌风险。为了规避高粱重金属经口摄入引起的健康风险，同时结合消费者的饮食结构及习惯，对辽宁五个地区高粱进行消费引导建议，以保证不同地区成人、儿童的暴露频率处于安全阈值内，控制高粱重金属的健康风险在可接受范围之内，进而为消费者提供科学可靠的参考建议。

基于 Monte-Carlo 模拟对模型数据进行健康风险暴露频率预测，五个地区不同人群的最佳暴露频率如表 5 所示。当沈河地区成人、儿童暴露频率分别控制在 68 d/a、58 d/a 以下时，可规避致癌风险；当建平地区成人、儿童暴露频率分别控制在 61 d/a、52 d/a 以下时，可规避致癌风险；当双塔地区成人、儿童暴露频率分别控制在 143 d/a、122 d/a 以下时，可规避致癌风险；当阜蒙地区成人、儿童暴露频率分别控制在 67 d/a、57 d/a 以下时，可规避致癌风险；当铁岭地区成人、儿童暴露频率分别控制在 130 d/a、111 d/a 以下时，可规避致癌风险。

表 5 辽宁省不同地区高粱重金属健康风险管理
Table 5 Health risk management of heavy metal content in sorghum from different regions of Liaoning Province

产地	人群	最佳暴露频率/(d/a)
沈河地区	成人	68
	儿童	58
建平地区	成人	61
	儿童	52
双塔地区	成人	143
	儿童	122
阜蒙地区	成人	67
	儿童	57
铁岭地区	成人	130
	儿童	111

3 结论

辽宁 49 份高粱样品中 Cd 含量范围在 0.002~0.056 mg/kg 之间，平均含量为 0.017 mg/kg；Cr 含量范围在 0.116~0.782 mg/kg 之间，平均含量为 0.311 mg/kg；49 份样品均符合国家限量标准，说明辽宁高粱的整体污染情况较轻。不同地区高粱样品的 Cd、Cr 含量存在显著差异，从 Cd 含量来看，双塔地区的含量是五个地区中最低的，平均值为 0.004 mg/kg，显著低于沈河地区和平建地区，与阜蒙地区和铁岭地区含量差异不显著；从 Cr 含量来看，阜蒙地区的含量显著高于其他四个地区，平均值为 0.558 mg/kg，其他四个地区之间差异不显著。以高粱样品 Cd、Cr 含量的平均值和中位值分别进行清洁程度综合评价，铁岭地区均为第一名，说明铁岭地区高粱样品整体清洁程度较好、污染较少。

基于 Monte-Carlo 模拟进行健康风险评估，五

个地区高粱对成人的健康风险可忽略,均处于安全水平;五个地区高粱对儿童的非致癌风险、综合非致癌风险及致癌风险可忽略,均处于安全水平,但沈河、建平、阜蒙三个地区高粱对儿童存在较低的综合致癌风险,可通过控制沈河、建平、阜蒙地区儿童的暴露频率低于58、52、57 d/a来规避风险。辽宁省是我国重要的工业基地,全省范围内的工业企业较多、矿产资源丰富、矿产开发历史较长,工业生产、煤炭开采、煤矸石的堆置、废弃的矿区等占用了大量的土地资源,会影响当地的土壤质量。沈河、建平、阜蒙三个地区高粱对儿童有较低的综合致癌风险,可能和三个地区进行的工业生产活动以及矿产开发有一定的关系。

本研究的健康风险评估模型部分参数选择根据《中国居民膳食指南》及《中国人群暴露参数手册》,人均每日高粱摄入量、暴露频率、暴露时间的选择可能存在一定局限性,日常生活中消费者对高粱的消费习惯不尽相同,但本研究从理论角度出发,以期对辽宁地区高粱食用安全提供参考。

参考文献

- [1] 王红梅,李哲,王松涛,等.基于理化性质和代谢组学的西南地区常规酿酒高粱与杂交高粱鉴别分析[J].食品工业科技,2024,45(19):256-267.
- [2] 刁现民.禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展[J].中国农业科学,2019,52(22):3943-3949.
- [3] HIMANI P, JAYANTI T, ANURAG M, et al. Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] grains [J]. Cereal Research Communications, 2021, 49(3): 343-353.
- [4] 段有厚,王艳秋,郭晓雷,等.中国高粱品种登记现状分析及建议[J].辽宁农业科学,2022,4:49-51.
- [5] 李顺国,刘猛,刘斐,等.中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):471-482.
- [6] 周韩玲,安明哲,赵东,等.不同产地及品种高粱中蜀黍氰苷含量的差异化分析[J].中国酿造,2023,42(7):209-213.
- [7] 张顺.红曲高粱酸面团的制备及其对面包品质的影响[D].成都:四川农业大学,2023.
- [8] 许家宝,王静,张唯玉,等.4种全株高粱青贮的饲用价值评定[J].动物营养学报,2024,36(3):1997-2009.
- [9] 胡春红,李新涛,肖冬光,等.不同品种糯高粱在酱香型白酒生产中的应用[J].食品与发酵工业,2025,51(1):99-107.
- [10] 张健,陈义嘉,谭均,等.黄连重金属污染分析及其健康风险评估[J].甘肃农业大学学报,2024,59(6):284-291.
- [11] ZEESHANUR R, PAL S V. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr) (VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(7): 419.
- [12] KANWAL R, FIZA F, IQRA W, et al. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences [J]. Journal of Cellular Biochemistry, 2018, 119(1): 157-184.
- [13] FU Z S, XI S H. The effects of heavy metals on human metabolism [J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2020, 30(3): 167-176.
- [14] 彭天舒,郭春景,李丽娜,等.杂粮重金属污染及其风险评估方法[J].农学学报,2023,13(7):75-79.
- [15] TANG L, DENG S H, TAN D L, et al. Heavy metal distribution, translocation, and human health risk assessment in the soil-rice system around Dongting Lake area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(17): 17655-17665.
- [16] ZHAO K L, FU W J, YE Z Q, et al. Contamination and spatial variation of heavy metals in the soil-rice system in Nanxun County, Southeastern China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12: 1577-1594.
- [17] CAI L M, WANG Q S, LUO J, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for children near a large Cu-smelter in central China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(Pt 1): 725-733.
- [18] 聂梅梅,景绘丽,李大婧,等.江苏不同产地莲藕中重金属含量及健康风险评估[J].江苏农业科学,2023,51(17):186-190.
- [19] WANG Q, FAN Z, QIU L, et al. Occurrence and health risk assessment of residual heavy metals in the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 97(1-4): 103787.
- [20] KAMALY H F, SHARKAWY A A. Health risk assessment of metals in chicken meat and liver in Egypt [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(7): 802.
- [21] 李晓贝,赵晓燕,刘海燕,等.基于蒙特卡罗模拟技术的食用菌中二氧化硫膳食暴露风险评估[J].食品科学,2020, 41(12):298-304.
- [22] 刘婷婷,汪云海,屠长河,等.基于蒙特卡罗树搜索的树图布局[J].计算机辅助设计与图形学学报,2021,33(9):1367-1376.
- [23] 姜紫翔,刘婷婷,孙清心,等.基于蒙特卡罗模拟的热电子器件注入效率研究[J].激光与光电子学进展,2021, 58(5):86-95.
- [24] 王立鹏,陈森,张信一,等.基于非结构网格粒子输运的蒙特卡罗模拟计算研究[J].核科学与工程,2024,44(2):286-294.
- [25] 王胜蓝,蒋月,马杰,等.基于蒙特卡罗模拟的危险废物处置场地下水重金属健康风险评估[J].有色金属(冶炼部

- 分),2024,1:143-153.
- [26] 蒋浩涛,马瑜.社会金融化影响家庭收入分配的微观机制研究——基于异质性收益率的蒙特卡罗模拟分析[J].现代金融,2024,4:12-21.
- [27] 刘美琪,刘子豪,卢晓明,等.基于蒙特卡罗模拟的小动物质子CT最优射束能量[J].中国医学影像技术,2022,38(10):1551-1555.
- [28] 段文佳,周德庆,张瑞玲.基于蒙特卡罗的水产品中甲醛定量风险评估[J].中国农学通报,2011,27(23):65-69.
- [29] GB5009.268-2016,食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [30] GB 2762-2022,食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [31] US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual supplemental guidance [R]. Washington, D C: Office of Emergency and Remedial Response, 2009.
- [32] 中国营养学会.中国居民膳食指南-2022[M].北京:人民卫生出版社,2022.
- [33] 顾丰颖,丁雅楠,朱金锦,等.我国稻米镉污染调查及健康风险评估[J].中国食品卫生杂志,2022,34(5):997-1004.
- [34] 环境保护部.中国人群暴露参数手册(成人卷)[M].北京:中国环境出版社,2013.
- [35] 环境保护部.中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)[M].北京:中国环境出版社,2016.
- [36] US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual [R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1989.
- [37] US EPA. Guidelines for exposure assessment [R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1992.
- [38] US EPA. Handbook for non-cancer health effects evaluation [R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [39] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2002.
- [40] US EPA. Exposure factor handbook [R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2011.