

风险评估

云南省市售天麻中常见风险因子污染分析及膳食暴露风险评估

董海燕¹, 许晓辉², 张磊³, 胡文敏¹, 陈留萍¹, 朱晓¹, 阮元¹, 苏玮玮¹, 赵晓慧¹, 蔡强²,
闵向东¹, 包汇慧³, 刘志涛¹

(1. 云南省公共卫生与生物安全重点实验室, 云南省疾病预防控制中心(云南省预防医学科学院), 云南 昆明 650022; 2. 浙江清华长三角研究院, 浙江 嘉兴 314006; 3. 国家食品安全风险评估中心, 中国医学科学院 食品安全创新单元, 国家卫生健康委员会食品安全风险评估重点实验室, 北京 100022)

摘要:目的 了解云南省市售天麻中常见风险因子污染水平, 评估其膳食暴露水平和健康风险。方法 利用2021年天麻风险监测数据、2017年天麻主产区消费量调查数据, 采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数反映风险因子的污染程度。采用概率评估方法, 计算食用天麻常见风险因子的暴露水平, 包括重金属(铅、镉、汞、砷、铬)、二氧化硫和农药残留(苯醚甲环唑、丙环唑、腐霉利、甲霜灵、咪鲜胺、联苯菊酯、氯氟氰菊酯), 综合考虑污染物的总膳食暴露水平, 参考国际食品法典委员会认定对膳食总暴露贡献显著的情形, 依据相应健康指导值占比或基准剂量评估其潜在健康风险。结果 天麻中常见重金属和农药残留总体污染水平均较低。普通人群食用天麻导致的镉、总铬、总汞和二氧化硫平均暴露量占健康指导值比值均低于5%; 镉的高暴露量(P_{95} 暴露量)占健康指导值比值为8.88%; 铅的平均暴露水平、总砷的平均暴露水平和高暴露水平 MOE 值均大于20, 铅的高暴露水平 MOE 值小于20, 需引起关注。在急性暴露情况下, 因食用天麻导致的苯醚甲环唑、甲霜灵和咪鲜胺急性暴露量占 ARfD 值分别为0.02%、0.01%和0.01%; 慢性暴露评估结果显示, 7种农药的一般人群暴露水平和高消费人群暴露水平占健康指导值比例均低于5%, 健康风险相对较低。结论 一般情况下, 因食用天麻暴露的铅、镉、总铬、总砷、总汞及农药残留对食用人群造成的健康风险较低, 需关注天麻高暴露人群镉和铅的健康风险。

关键词: 天麻; 重金属; 农药残留; 污染水平; 暴露评估

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2025)01-0060-10

DOI: 10.13590/j.cjfh.2025.01.009

Analysis of common risk factors and dietary exposure of *Gastrodia elata* B1. sold
in Yunnan Province

DONG Haiyan¹, XU Xiaohui², ZHANG Lei³, HU Wenmin¹, CHEN Liuping¹, ZHU Xiao¹, RUAN Yuan¹,
SU Weiwei¹, ZHAO Xiaohui¹, CAI Qiang², MIN Xiangdong¹, BAO Huihui³, LIU Zhitao¹

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Public Health and Biosafety, Yunnan Center for Disease Control and Prevention (Yunnan Provincial Academy of Preventive Medical Sciences), Yunnan Kunming 650022, China; 2. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang Jiaxing 314006, China; 3. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Chinese Academy of Medical Sciences, NHC Key Laboratory of Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

Abstract: Objective To analyze the pollution levels of common risk factors in *Gastrodia elata* B1. sold in Yunnan province, and to evaluate its dietary exposure levels and health risks. **Methods** Using the risk monitoring data of *Gastrodia elata* B1. in 2021 and the consumption survey data from the main production areas of *Gastrodia elata* B1. in 2017. Single factor pollution index and Nemero comprehensive pollution index were used to reflect the pollution levels of risk factors. Probability evaluation method was used to calculate the exposure levels of common risk factors in *Gastrodia*

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 国家重点研发计划资助(2023YFF1103804); 国家食品安全风险评估中心高层次人才队伍建设项目

作者简介: 董海燕 女 副主任医师 研究方向为营养与食品安全 E-mail: 59745519@qq.com

通信作者: 包汇慧 女 研究员 研究方向为食品安全与风险评估 E-mail: baohuihui@cfsa.net.cn

刘志涛 男 主任医师 研究方向为营养与食品安全 E-mail: 156423746@qq.com

包汇慧和刘志涛为共同通信作者

elata B1, including heavy metals(lead, cadmium, mercury, arsenic, chromium), sulfur dioxide, and pesticide residues (difenoconazole, propiconazole, procymidone, metalaxyl, prochloraz, bifenthrin, cyhalothrin). The total dietary exposure levels of contaminants were comprehensively considered, referencing the Codex Alimentarius Commission's identification of significant contributions to total dietary exposure. The potential health risks were assessed . based on the proportion of corresponding health guidance values or benchmark doses. **Results** The overall pollution levels of common heavy metals and pesticide residues in *Gastrodia elata* B1. were relatively low. The average exposure levels of cadmium, total chromium, total mercury, and sulfur dioxide caused by the consumption of *Gastrodia elata* B1. by the general population are all less than 5% of the health guidance values; The high exposure level (P_{95} value) of cadmium accounted for 8.88% of the health guidance value; MOE values for both the general exposure level of lead, the general and high exposure level of total arsenic were greater than 20. However, the MOE of high exposure level of lead was less than 20, which health risk requires attention. Under acute exposure conditions, The ARfD values of acute exposure to difenoconazole, metalaxyl and prochloraz caused by consuming *Gastrodia elata* B1. were 0.02%, 0.01%, and 0.01%, respectively; The results of chronic exposure assessment showed that the exposure levels of the general population and high consumption population to the seven pesticides accounted for less than 5% of the health guidance values, indicating relatively low health risks. **Conclusion** In general, the health risks to the consumer population caused by exposure to lead, cadmium, total chromium, total arsenic, total mercury, and pesticides from consuming *Gastrodia elata* B1. are relatively low; In high exposure situations, attention should be paid to the health risks of cadmium and lead.

Key words: *Gastrodia elata* B1; heavy metals; pesticide residues; pollution level; exposure assessment

天麻为兰科植物天麻(*Gastrodia elata* Bl.)的干燥块茎,收载于《中华人民共和国药典》(2020年)。天麻在我国有悠久的食用历史,最早在东汉时期《神农本草经》中天麻名曰赤箭,列草部上品,记载称“久服益气力,长阴肥健,轻身增年”^[1]。我国现存最早的医学著作《黄帝内经》提出“天麻入药治病,兼食用补身体”。《昭通天麻的研究与开发》一书中收集整理了10部记载以保健为目的食用天麻的中国古典书籍^[2]。研究发现天麻具有镇静、抗炎、抗氧化、改善记忆力、降血压等功效^[3-5],《卫生部关于进一步规范保健食品原料管理的通知》(卫法监发[2002]51号)将天麻列入可用于保健食品的物品名单,截至2024年9月,从国家特殊食品信息查询平台(网站地址: <http://ypzxs.gsxt.gov.cn/specialfood/#/food>)检索的数据显示,以天麻为主要原料获批的保健食品产品有146个。天麻在产地食用的主要方式多为煲汤、炖肉、做调味料,或是作为药膳食用。《关于党参等9种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》(2023年第9号)将天麻正式纳入我国按照传统既是食品又是中药材的物质(以下简称食药物质)目录,天麻可作为食品生产和销售,促进了天麻的种植、加工和新产品研发等整个产业链的发展,天麻的使用和食用将进入一个新阶段,将天麻作为食品消费的人群和食用量将大大增加。

天麻在种植和加工过程受土壤、农业投入品等影响,可能导致重金属、农药等污染,进而通过食品链进入人体内,带来一定的健康风险。为全面了解云南省市售天麻中常见风险因子的浓度水平、污染

特征和健康风险,对天麻中常见重金属[铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铬(Cr)],二氧化硫,以及使用范围广、频率高的农药杀菌剂5项(苯醚甲环唑、丙环唑、腐霉利、甲霜灵、咪鲜胺)、拟除虫菊酯2项(联苯菊酯、氯氟氰菊酯),开展污染程度分析并进一步评估云南省居民通过食用天麻导致的相关风险因子暴露水平和健康风险,为天麻的安全食用及科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 含量数据

含量数据来自2021年云南省食品安全风险监测数据,天麻样品数量共计160份(130份干品,30份鲜品),采自云南省16个州市的市售环节,其中1份天麻样品产自湖北省,其余159份均产自云南省。参照《2014年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册》^[6],采用《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(GB 5009.12—2017)、《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》(GB 5009.11—2014)、《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》(GB 5009.17—2014)、《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)、《食品安全国家标准 食品中铬的测定》(GB 5009.123—2014)中等离子体电感耦合-串联质谱(ICPMS)、《食品安全国家标准 食品中二氧化硫的测定》(GB 5009.34—2016)、《食品安全国家标准 食品中苯醚甲环唑残留量的测定 气相色谱-质谱法》(GB 23200.49—2016)、《食品安

国家标准 水果和蔬菜中 500 种农药及相关化学
品残留量的测定气相色谱-质谱法》(GB 23200.8—
2016)方法进行检测。检测指标的检出限和定量限
见表 1。

表 1 天麻检测指标的检出限和定量限

Table 1 Detection limit and quantification limit of indicators in *Gastrodia elata* B1

项目	检出限/(mg/kg)	定量限/(mg/kg)	项目	检出限	定量限
苯醚甲环唑	0.000 3	0.001	Pb/(mg/kg)	0.004	0.012
丙环唑	0.000 3	0.001	Cd/(mg/kg)	0.003	0.009
腐霉利	0.002	0.006	总 Cr/(mg/kg)	0.01	0.03
甲霜灵	0.000 3	0.001	总 Hg/(mg/kg)	0.003	0.009
联苯菊酯	0.003	0.01	总 As/(mg/kg)	0.004	0.012
氯氟氰菊酯	0.01	0.03	二氧化硫/(g/kg)	0.001	0.003
咪鲜胺	0.000 3	0.001	—	—	—

1. 1. 2 膳食消费量数据

天麻消费量数据来自 2017 年天麻食用消费状
况调查。该调查采用多阶段分层随机抽样的方法,
抽取云南省天麻主要产区昭通市作为调查点,抽取
2 县(市)、4 乡镇、8 个村委会(社区)、320 户居住
6 个月以上的常住家庭成员 506 人(3 岁及以上)作
为调查对象。研究过程严格遵守知情同意与保密
原则,入选调查对象均签署知情同意书。

1. 2 方法

1. 2. 1 污染程度判定方法

为反映风险因子单独的污染程度和同类别污
染物的总体程度^[7],分别计算单因子污染指数(Single
factor pollution index, SFPI)和重金属、农药残留的内
梅罗综合污染指数(Nemerow comprehensive pollution
index, NCPI)。单因子污染指数计算公式为:

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

式中 P_i 为天麻样品中污染物 i 的单项污染指数, C_i
为天麻样品中污染物 i 的平均值(mg/kg), S_i 为污染
物 i 的评价标准(mg/kg)。参考《农、畜、水产品污染
监测技术规范》(NY/T 398—2000)规定的农产品质
量分级标准,可根据单因子污染指数将污染水平分
为 3 个等级^[8], $P_i \leq 0.6$ 为安全, $0.6 < P_i < 1.0$ 为轻度污
染, $P_i \geq 1.0$ 为重度污染。

内梅罗综合污染指数计算公式为:

$$P_{(N)} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{max}^2 + (C_i/S_i)_{ave}^2}{2}} \tag{2}$$

式中 $P_{(N)}$ 为综合污染指数, $(C_i/S_i)_{max}$ 为风险因子中污
染指数最大值, $(C_i/S_i)_{ave}$ 为风险因子中污染指数算
术平均值。综合污染指数分为 3 个等级, $P_{(N)} \leq 0.6$
为安全, $0.6 < P_{(N)} < 1$ 为轻度污染, $P_{(N)} \geq 1.0$ 为重度
污染^[9-10]。

1. 2. 2 暴露评估方法

慢性暴露评估采用联合国粮食及农业组织
(Food and Agriculture Organization of the United Nations,
FAO)和世界卫生组织(World Health Organization,
WHO)推荐的《食品中化学物风险评估原则和方法》

中概率评估方法^[11],通过建立污染物含量数据库和
消费量数据库,对含量和消费量数据进行最优拟
合,然后对拟合的分布进行抽样模拟,分别随机抽
取数值计算得到一般成年人的暴露量概率分布。
每次模拟过程进行抽样 10 000 次迭代运算,组成一
个 bootstrap 样本,再基于此样本进行 Monte Carlo 模
拟,从而获得各统计量的分布数值^[12],使用百分位
数法估计 bootstrap 的 95% 置信区间。

急性暴露评估通过计算急性膳食摄入风险(%
ARfD)来衡量,%ARfD 越小风险越小,%ARfD<100%
时,表示急性风险可以接受^[11]。计算公式为:

$$IESTI=(LP \times HR)/BW \tag{3}$$

$$\%ARfD=IESTI/ARfD \times 100 \tag{4}$$

式中, $IESTI$ 为国际估计的短期暴露量,单位为
mg/(kg·BW/d); HR 为最大残留浓度值,单位为
mg/kg; LP 为高端消费水平(第 97.5 百分位数消费
量,单位为 kg; BW 为体质量(kg); $ARfD$ 为急性参考
剂量,单位为 mg/(kg·BW)。

1. 2. 3 风险特征描述

依据联合国粮食及农业组织/世界卫生组织食
品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert
Committee on Food Additives, JECFA)的评估报告,
目前尚无明确可用于无机 As 和 Pb 风险特征描述
的健康指导值,由于本次研究监测天麻中的 As 为总
砷,依据风险评估的安全保护原则,做保守假设此
次总砷中无机 As 占比 100%。以无机 As 导致人类
肺癌为毒性效应终点的基准剂量的下限(BMDL₀₅)
为 3~5 μg/(kg·BW)^[13],本研究采用 BMDL₀₅ 为
3 μg/(kg·BW)。JECFA 规定成年人 Pb 的 BMDL₀₁ 为
1.3 μg/(kg·BW)(收缩压上升 1 mmHg)^[14]。无机 Hg
暂定每周可耐受摄入量(Provisional tolerable weekly
intake, PTWI)为 4 μg/(kg·BW)^[15]。2011 年第 73 次
会议 JECFA 制定的食品中 Cd 的暂定每月允许摄
入量(Provisional tolerable monthly intake, PTMI)
为 25 μg/(kg·BW)^[16]。2014 年欧洲食品安全局
(European Food Safety Authority, EFSA)提出的食物

中三价铬的每日可耐受摄入量(Tolerable daily intake, TDI)为 0.3 mg/(kg·BW)^[17]。JECFA 建议二氧化硫的每日允许摄入量(Acceptable daily intake, ADI)为 0~0.7 mg/(kg·BW)^[18]。农药的健康指导值以 FAO/WHO 农药残留联席会议(Joint Meeting on Pesticide Residues, JMPR)^[19]及 EFSA 公布的 ARfD^[20]、《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)公布的 ADI 为参考。健康指导值见表 2。

表 2 各类风险因子的健康指导值及来源
Table 2 Health guidance values for different risk factors

类别	项目	ADI	来源	ARfD	来源
农药	苯醚甲环唑	0.01 mg/(kg·BW)	GB 2763—2021	0.3 mg/(kg·BW)	EFSA
	丙环唑	0.07 mg/(kg·BW)		0.3 mg/(kg·BW)	EFSA
	腐霉利	0.1 mg/(kg·BW)		0.1 mg/(kg·BW)	JMPR
	甲霜灵	0.08 mg/(kg·BW)		0.5 mg/(kg·BW)	EFSA
	联苯菊酯	0.01 mg/(kg·BW)		0.01 mg/(kg·BW)	JMPR
	氯氟氰菊酯	0.02 mg/(kg·BW)		0.02 mg/(kg·BW)	EFSA
	咪鲜胺	0.01 mg/(kg·BW)		0.1 mg/(kg·BW)	JMPR
重金属	Pb	1.3 μg/(kg·BW)	JECFA	—	—
	Cd	25 μg/(kg·BW)	JECFA	—	—
	Hg	4 μg/(kg·BW)	EFSA	—	—
	As	3 μg/(kg·BW)	JECFA	—	—
	Cr	0.3 mg/(kg·BW)	EFSA	—	—
其他	二氧化硫	0.7 mg/(kg·BW)	JECFA	—	—

注:ADI为每日允许摄入量;ARfD为急性参考剂量;EFSA为欧洲食品安全局;JMPR为农药残留联席会议;JECFA为联合国粮食及农业组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会

综合考虑我国居民总膳食中污染物的暴露水平^[21-22]和国际食品法典委员会认定对总暴露贡献显著的情形,将天麻中污染物暴露量不超过健康指导值的 5% 确定为风险可以接受^[23]。采用暴露边界(Margin of exposure, MOE)法对天麻中 As 和 Pb 暴露进行风险评估,计算无机 As 和 Pb 基准剂量下限(BMDL₀₅和 BMDL₀₁)与天麻中对应 As 和 Pb 暴露量的比值,该值越大暴露风险越低,通常认为 MOE>1 时健康风险相对较低。考虑天麻在膳食结构中的占比低于常规食品,假设天麻中 As 和 Pb 的暴露量占膳食总暴露量 5%,即取天麻中 As 和 Pb 的 MOE>20 时判断为健康风险相对较低。

1.3 统计学分析

采用 Excel 2016 进行数据的整理,运用 R 软件(4.0.3 版本)进行统计分析。按照 WHO 的数据处理原则,对于未检出样品占总样品量的比例小于 60% 时,所有未检出数据用 1/2 检出限(Limit of detection, LOD)替代;未检出样品占总样品量的比例大于 60% 时,所有未检出数据用 LOD 替代^[24]。

2 结果

2.1 天麻中重金属污染情况

对 100 份干天麻样品和 30 份鲜天麻样品进行重金属项目检测。Pb、Cd、总 Cr、总 As 检出率分别为 100.00%、100.00%、86.92%、79.23%,总 Hg 未检出(表 3、表 4)。根据《中华人民共和国药典》(2020 年)规定天麻干品水分≤15.0 g/100 g,天麻鲜品水分参考值为 75 g/100 g,将鲜天麻污染物含量按

脱水率折算为干天麻后的重金属含量,依据《关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》(2023 年第 9 号)中天麻安全指标限量值(Pb≤1.0 mg/kg、As≤0.5 mg/kg、Hg≤0.05 mg/kg、Cd≤1.0 mg/kg)进行超标判定;根据食药物质特点、天麻植物性状和产地食用习惯,铬污染水平参考《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)豆类铬元素标准(Cr≤1.0 mg/kg)进行超标率判定,其中总铬的超标率最高,为 3.08%,其次为 Pb(2.31%),再次为总 As(1.54%),Cd 均有检出但未超标,总 Hg 未检出(表 4)。

将鲜天麻中重金属含量按脱水率折算为干天麻,合并后以 130 份天麻样品重金属含量数据进行单因子污染指数和综合污染指数评价。结果表明,天麻中铅、镉、总铬、总汞、总砷的单因子污染指数均≤0.6,5 类重金属内梅罗综合污染指数为 0.30,天麻中重金属总体污染程度判断为安全(表 5)。

2.2 天麻中二氧化硫的污染情况

130 份干天麻中二氧化硫含量平均值为 0.11 g/kg(表 6),根据《关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》(2023 年第 9 号)中天麻 SO₂ 安全限量值≤400 mg/kg 进行判断,超标率为 10%。二氧化硫的单因子污染指数为 0.3,污染程度判断为安全。

2.3 天麻中农药残留污染情况

对 130 份干天麻及 30 份鲜天麻样品中的 7 种农药按照标准方法进行含量检测(表 7)。参照《食

表 3 天麻中重金属检测情况

Table 3 Overall situation of pesticide residues in <i>Gastrodia elata</i> B1								
名称	项目	样品数/份	检出率/%	平均值/(mg/kg)	P ₅₀ /(mg/kg)	P ₉₅ /(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
干天麻	Pb	100	100	0.339	0.285	0.750	0.071	1.260
	Cd	100	100	0.206	0.121	0.558	0.047	0.799
	总 Cr	100	100	0.455	0.319	0.860	0.125	8.270
	总 Hg	100	0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
	总 As	100	98.00	0.080	0.044	0.245	0.002	0.927
鲜天麻	Pb	30	100	0.104	0.090	0.194	0.012	0.348
	Cd	30	100	0.085	0.068	0.172	0.020	0.217
	总 Cr	30	43.33	0.017	0.012	0.041	0.005	0.047
	总 Hg	30	0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	总 As	30	16.67	0.003	0.002	0.006	0.002	0.007

表 4 天麻中重金属污染总体情况

Table 4 Detection of heavy metals in dried <i>Gastrodia elata</i> B1									
项目	样品数/份	检出率/%	平均值/(mg/kg)	P ₅₀ /(mg/kg)	P ₉₅ /(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	标准限值(mg/kg)	超标率/%
Pb	130	100	0.321	0.271	0.745	0.030	1.260	≤1.0	2.31
Cd	130	100	0.207	0.128	0.552	0.047	0.799	≤1.0	0
总 Cr	130	86.92	0.360	0.270	0.664	0.013	8.270	≤1.0	3.08
总 Hg	130	0	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	≤0.05	0
总 As	130	79.23	0.064	0.029	0.229	0.002	0.927	≤0.5	1.54

表 5 天麻中重金属污染评价结果

Table 5 Evaluation results of heavy metal pollution in <i>Gastrodia elata</i> B1				
项目	单因子污染	单因子污染指数	综合污染	综合污染指数
	指数	评价结果	指数	评价结果
Pb	0.32	安全	0.30	安全
Cd	0.21	安全		
总 Cr	0.36	安全		
总 Hg	0.04	安全		
总 As	0.13	安全		

表 6 干天麻中二氧化硫含量

Table 6 Sulfur dioxide content in dried <i>Gastrodia elata</i> B1					
样品量/份	检出率/%	平均值/ (g/kg)	标准 差	P ₅₀ / (g/kg)	P ₉₅ / (g/kg)
130	67.69	0.11	0.19	0.03	0.47

表 7 天麻农药残留检测情况

Table 7 Overall situation of pesticide residues in <i>Gastrodia elata</i> B1								
名称	项目	样品数	检出率/%	均值/(mg/kg)	P ₅₀ /(mg/kg)	P ₉₅ /(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
干天麻	苯醚甲环唑	130	3.85	0.002	0.000	0.000	0.000	0.195
	丙环唑	130	2.31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
	腐霉利	130	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	甲霜灵	130	2.31	0.002	0.000	0.000	0.000	0.166
	联苯菊酯	130	0	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
	氯氟氰菊酯	130	0	0.004	0.005	0.005	0.001	0.005
	咪鲜胺	130	0.77	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037
鲜天麻	苯醚甲环唑	30	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	丙环唑	30	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	腐霉利	30	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	甲霜灵	30	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	联苯菊酯	30	0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	氯氟氰菊酯	30	0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	咪鲜胺	30	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

利用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数法,对天麻中单一农药残留和全部农药污染水平进行评价。结果显示,天麻中苯醚甲环唑、丙环唑、甲霜灵、腐霉利、咪鲜胺、联苯菊酯和氯氟氰菊酯 7 种农药残留单因子污染指数均低于 0.6,可判断为安全,7 种农药残留总含量的内梅罗综合污染指数为

表8 天麻中农药残留总体情况

Table 8 Overall situation of pesticide residues in *Gastrodia elata* B1

项目	样品数/份	检出率/%	平均值/(mg/kg)	P ₅₀ /	P ₉₅ /	最小值/	最大值/	标准限值/	超标率/%
				(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	
苯醚甲环唑	160	3.85	0.002	0.000	0.000	0.000	0.195	≤0.02	1.25
丙环唑	160	2.31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	≤0.05	0
腐霉利	160	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	≤5	0
甲霜灵	160	2.31	0.002	0.000	0.000	0.000	0.166	≤0.05	1.25
联苯菊酯	160	0	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	≤0.05	0
氯氟氰菊酯	160	0	0.004	0.005	0.005	0.001	0.005	≤0.01	0
咪鲜胺	160	0.77	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	≤0.3	0.63

0.29,可判断7种农药残留总体污染程度为安全(表9)。

表9 天麻农药残留评价结果

Table 9 Evaluation results of pesticide residues pollution in *Gastrodia elata* B1

项目	单因子污	单因子污染指	综合污染	综合污染指数
	染指数	数评价结果	指数	评价结果
苯醚甲环唑	0.10	安全	0.29	安全
丙环唑	0.01	安全		
腐霉利	0.00	安全		
甲霜灵	0.04	安全		
联苯菊酯	0.02	安全		
氯氟氰菊酯	0.40	安全		
咪鲜胺	0.00	安全		

2.4 消费状况调查结果

调查云南省天麻主产区住户人群506人,男性264人,女性242人,男女性别比为1.09:1。调查人群年龄范围为3~93岁;以18~59岁人群最多,占69.57%(表10)。被调查对象平均体质量为55.17 kg。食用天麻年限范围为2~40年,调查人群天麻食用率为97.43%,其中干天麻食用率0.40%,鲜天麻食用率96.64%,天麻制品食用率2.4%。将鲜天麻食用量按脱水率折算为干天麻,493名天麻或其制品食用者每人每日干天麻食用量范围为0.01~87.19 g,食用人群每人每日天麻平均食用量为4.01 g,P₅₀、P₉₅(高消费人群)食用量分别为1.44和13.06 g。

表10 天麻消费量调查人群特征

Table 10 Consumption characteristics of *Gastrodia elata* B1

年龄/岁	性别/人		占比/%
	男	女	
3~5	8	10	3.56
6~13	28	20	9.49
14~17	21	9	5.93
18~59	174	178	69.57
≥60	33	25	11.46
合计	506		100

2.5 天麻中重金属和二氧化硫暴露评估

鲜天麻中重金属和二氧化硫含量按脱水率折算成干天麻,天麻中重金属和二氧化硫暴露概率评估均基于干天麻含量数据库和消费量数据库,以暴露量的均值和P₉₅值代表一般人群和高消费人群的

暴露水平,并与相应的健康指导值或基准剂量比较。总Cr、总Hg和二氧化硫的一般人群暴露水平和高消费人群暴露水平占健康指导值比例均低于5%;镉的一般人群暴露水平占健康指导值比例低于5%,高消费人群暴露水平占健康指导值的比例为8.88%;铅和总砷的一般暴露水平及总As的高暴露水平MOE值均大于20(表11),铅的高消费人群暴露水平MOE值小于20。提示天麻消费者As暴露和Pb一般人群暴露健康风险相对较低。

2.6 农药残留暴露评估

2.6.1 急性暴露评估

天麻中有3种农药残留超标,分别为苯醚甲环唑、甲霜灵和咪鲜胺,在急性暴露情况下,检出值取最大值,消费量为食用人群P_{97.5}消费量(20.24 g),体重为被调查对象平均体重(55.17 kg),计算苯醚甲环唑、甲霜灵和咪鲜胺的急性暴露量占ARfD值分别为0.02%、0.01%、0.01%(表12)。

2.6.2 慢性暴露评估

基于天麻中检出农药的含量数据库和天麻个体消费量数据库,开展概率评估得到全部个体暴露量计算的均值和P₉₅值,分别代表一般人群和高消费人群的暴露水平,并与相应的健康指导值比较。暴露量在前三位的分别为氯氟氰菊酯、苯醚甲环唑及甲霜灵。与各自的健康指导值比较发现,天麻样品中检出7种农药的一般人群暴露水平和高消费人群暴露水平占健康指导值比例分别低于3%及5%(表13),健康指导值占比最高的为天麻高消费人群氯氟氰菊酯(4.32%),其次为联苯菊酯(3.35%)。其中氯氟氰菊酯和联苯菊酯在天麻样品中均为未检出,根据食品污染监测低水平数据处理原则,当未检出样品的比例高于总样品数的60%时,所有未检出数据用检出限替代,对暴露量造成一定程度的高估,致使其健康指导值占比升高。

3 讨论

天麻在我国有两千年的使用和食用历史。作为重要的传统中药材,具有平肝息风、止痉祛风等

表 11 天麻中重金属和二氧化硫膳食暴露评估

Table 11 Assessment of dietary exposure to heavy metals and sulfur dioxide in <i>Gastrodia elata</i> B1						
人群分组	重金属	暴露量(95%CI)/[μg/(kg·BW·d)]	健康指导值或参考值/[μg/(kg·BW)]	占健康指导值比例/%	MOE	
一般人群	Cd	平均值	0.018(0-0.122)	25(PTMI)	2.16	—
	总 Cr	平均值	0.023(0-0.143)	300(TDI)	0.01	—
	总 Hg	平均值	0(0-0.001)	4(PTWI)	0.00	—
	Pb	平均值	0.027(0-0.176)	1.3(BMDL ₀₁)	—	48.15
	总 As	平均值	0.004(0-0.029)	3(BDML ₀₅)	—	750.00
	二氧化硫	平均值	0.007(0-0.060)	700(ADI)	0.001	—
高消费人群	Cd	P ₉₅	0.074	25(PTMI)	8.88	—
	总 Cr	P ₉₅	0.089	300(TDI)	0.03	—
	总 Hg	P ₉₅	0	4(PTWI)	0.00	—
	Pb	P ₉₅	0.106	1.3(BMDL ₀₁)	—	12.26
	总 As	P ₉₅	0.017	3(BDML ₀₅)	—	176.47
	二氧化硫	P ₉₅	0.032	700(ADI)	0.005	—

注:PTMI为暂定每月允许摄入量;TDI为每日可耐受摄入量;ADI为每日允许摄入量;BMDL为基准剂量可信限的下限值

表 12 天麻中农药残留急性膳食暴露评估

Table 12 Assessment of acute dietary exposure to pesticide residues in <i>Gastrodia elata</i> B1					
项目	最大残留量/(mg/kg)	P _{97.5} 消费量/g	短期摄入量/[μg/(kg·BW)]	急性参考剂量/(mg/kg)	急性参考剂量占比/%
苯醚甲环唑	0.195	20.24	0.072	0.3	0.02
甲霜灵	0.166	20.24	0.061	0.5	0.01
咪鲜胺	0.037	20.24	0.014	0.1	0.01

表 13 天麻中农药残留膳食暴露评估

Table 13 Assessment of dietary exposure to pesticide residues in <i>Gastrodia elata</i> B1					
人群分组	农药残留	暴露量(95%CI)/[×10 ⁻⁵ mg/(kg·BW/d)]	健康指导值/[mg/(kg·BW)]	占健康指导值比值/%	
一般人群	苯醚甲环唑	平均值	21.03(0.02~15.25)	0.01	2.10
	丙环唑	平均值	1.85(0.02~7.25)	0.07	0.03
	腐霉利	平均值	5.89(0.12~36.39)	0.1	0.06
	甲霜灵	平均值	13.72(0.02~12.20)	0.08	0.17
	联苯菊酯	平均值	8.53(0.15~52.37)	0.01	0.85
	氯氟氰菊酯	平均值	27.00(0.23~112.29)	0.02	1.35
	咪鲜胺	平均值	3.55(0.02~6.56)	0.01	0.36
高消费人群	苯醚甲环唑	P ₉₅	5.62	0.01	0.56
	丙环唑	P ₉₅	4.35	0.07	0.06
	腐霉利	P ₉₅	23.07	0.1	0.23
	甲霜灵	P ₉₅	5.11	0.08	0.06
	联苯菊酯	P ₉₅	33.5	0.01	3.35
	氯氟氰菊酯	P ₉₅	86.47	0.02	4.32
	咪鲜胺	P ₉₅	4.06	0.01	0.41

多种功效,现代科学研究表明天麻中富含天麻素、甾体类、糖类、苷等多种生物活性物质,近年来研究发现天麻还具有增智、健脑、延缓衰老等养生作用^[25]。天麻广泛分布于中国、日本、韩国、尼泊尔、印度等地,在这些国家和地区作为药材或保健品使用。云南为我国栽培天麻的主产区,目前种植面积10余万亩,年综合产值超过90亿元^[26]。天麻自古以来作为养生保健的重要食养物质,在不同朝代均有食用方法记载,如唐代记载天麻作为食物采后鲜生吃,宋代除生吃外,还可进行蜜煎或蜜渍加工成蜜饯或果脯食用。蒸煮的食用方法自宋代以来最为常见^[27]。现代药膳中多用天麻与肉类炖煮、泡酒、做茶、煲汤食用。随着人工栽培天麻的不断扩大,天

麻的食养价值受到越来越多的重视,相关的养生食品开发与市场化也随之迅速发展。天麻的消费地区和消费人群、消费量也不断增加。

2023 年天麻正式被批准作为食药物质,可作为食品原料进行生产加工,这将进一步扩大天麻的消费地区,增加食用消费量,天麻的食用安全性也受到更多的关注。天麻外源性污染物带入的健康风险成为关注的重点。外源污染物包括重金属、农药残留及生产加过程中的环境污染物,其中最受关注的为天麻中重金属的污染及作为食品食用时引起的健康风险。天麻的食用部位为块茎,在土壤中生长周期较长,自然情况下在3年左右,天麻中的重金属主要来自种植过程中土壤、养分吸收和农业投入品。

本研究结果显示天麻中铅、镉、总铬、总砷均有检出,检出率分别为 100%、100%、86.92%、79.23%,总汞未检出。其中总铬、铅、总砷存在超标,超标率分别为 3.08%、2.31%、1.54%,镉有检出但未超标。这与黄小兰^[28]、包汇慧^[29]和王海^[30]等报道的结果相似。采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数对天麻中 5 种重金属单一及综合污染程度进行分级,结果显示以上 5 种重金属的单因子污染程度和总体污染程度均为安全。

天麻重金属元素膳食暴露评估结果表明,天麻中 5 种重金属暴露水平均低于相应的健康指导值或基准剂量。但重金属膳食暴露来源多样,来自天麻的暴露只是其中一部分,本次评估对来自天麻的重金属可接受暴露水平给予 5% 的健康指导值分配系数。镉的一般人群暴露水平,以及总铬、总汞一般人群暴露水平和高暴露水平对健康指导值占比均未超过 5%,健康风险不需关注;但天麻高消费人群镉暴露水平(P_{95} 值)对健康指导值占比超过 5% (8.88%),对天麻高消费人群具有潜在的健康风险,应予以关注。天麻中铅一般人群暴露量、总砷一般人群暴露量和高消费人群暴露量的 MOE 值均大于 20,健康风险较低;天麻高消费人群铅的 MOE 值小于 20,应关注天麻高消费人群铅暴露的潜在健康风险。为保障食用安全,应通过严格控制栽培土壤、灌溉用水、农业投入品等的重金属含量,尽可能降天麻中重金属含量。

在中医药领域,硫磺熏蒸加工方法作为传统的中药材养护方法,具有快速干燥、漂白、防霉、防虫和延长贮藏期等作用,但过量使用可改变药性和化学成分,甚至危害人体健康^[31]。本研究结果显示,干天麻中二氧化硫存在一定程度超标,但结合天麻消费量数据计算二氧化硫的暴露量,一般人群及高消费人群暴露量占健康指导值比例不超过 0.05%,健康风险较低。

天麻在种植过程中为防治真菌病害和蛱蛄、蛴螬等虫害,往往拌撒一定量的农药^[32]。本研究结果显示,天麻中苯醚甲环唑、丙环唑、甲霜灵、腐霉利、咪鲜胺、联苯菊酯和氯氟氰菊酯单因子污染指数法评价结果均小于 0.6,根据判定标准处于安全级别;根据内梅罗综合污染指数判断 7 种农药残留总体污染程度处于安全级别。其中苯醚甲环唑、甲霜灵和咪鲜胺检出超标样品,急性暴露评估结果表明,急性暴露量分别占 ARfD 的 0.02%、0.01% 和 0.01%;慢性暴露评估结果显示,7 种农药的一般人群暴露水平和高消费人群暴露水平占健康指导值比例均低于 5%,健康风险相对较低,急性健康风险较小。

苯醚甲环唑、甲霜灵和咪鲜胺是内吸型杀菌剂,属于环境激素类农药,存在一定生殖发育毒性等健康风险,建议进一步加强监管和综合治理,控制农药残留源头污染,以保障天麻的食用安全。

本研究中暴露评估存在一定的不确定性,首先本次评估结论基于现有可获得资料得出,天麻来自云南省不同地区市售环节,存在品种不确定性;天麻消费量数据仅来自食用人群数据,对全人群外推可能存在高估;铬、汞和砷未开展不同价态检测,计算中采用了替代法的情景假设,存在一定的不确定性;由于缺乏食品加工因子的数据,未将食品加工烹饪过程对食品污染物的影响计算在内,这也可能产生不确定性。同时考虑到重金属在各类食品中普遍存在,针对天麻的健康指导值分配系数是基于既往经验的参考值,存在一定不确定性。研究表明重金属间可能存在协同作用^[33-34],因此有必要继续进行相关累积暴露风险评估的研究。

参考文献

- [1] 高海波,谭兴贵.图解神农本草经[M].南京:江苏科学技术出版社,2020,64.
GAO H B, TAN X G. Illustrated shennong materia medica classic [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2020, 64.
- [2] 张光明,杨廉玺.昭通天麻的研究与开发[M].昆明:云南科技出版社,2008.
ZHANG G M, YANG L X. Research and development of Zhaotong Tianma [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2008.
- [3] 刘萌萌,章柏钰,张伊,等.天麻多糖对中枢神经系统疾病作用的研究进展[J].中国药师,2021,24(10):1882-1888.
LIU M M, ZHANG B Y, ZHANG Y, et al. Research progress on the effects of Gastrodia elata polysaccharides on central nervous system diseases [J]. Chinese Pharmacologist, 2021, 24 (10): 1882-1888.
- [4] ZENGHU S, YUANGUI Y, SHIZHONG C, et al. The processing methods, phytochemistry and pharmacology of Gastrodia elata Bl: A comprehensive review [J]. Journal of Ethnopharmacol. 2023, 314: 116467.
- [5] 尚玉杰,张强,韩彦斌,等.天麻化学成分、药理作用及其产品开发分析[J].中医药学报,2024,52(8):115-121.
SHANG Y J, ZHANG Q, HAN Y B, et al. Chemical composition, pharmacological effects, and product development analysis of Tianma [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2024, 52(8): 115-121.
- [6] 杨大进,李宁,蒋定国.2014年国家食品污染和有害因素风险监测工作手册[M].北京:中国标准出版社,2014.
YANG D J, LI N, JIANG D G. National food contamination and harmful factors risk monitoring workbook 2014 [M]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [7] 刘萍,任梁,周伟杰,等.无锡市谷物重金属污染状况及健

- 康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(4): 420-425.
- LIU P, REN L, ZHOU W J, et al. Grain heavy metal pollution status and health risk assessment in Wuxi City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 420-425.
- [8] 中华人民共和国农业部. 农、畜、水产品污染监测技术规范: NY/T 398—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- Ministry of Agriculture of the PRC. Procedural regulations regarding monitoring of pollutants in the produces of agriculture, animal husbandry and fishery: NY/T 398—2000 [S]. Beijing: China Standard Press, 2000.
- [9] 高日红, 高云霄, 董峰光, 等. 我国胶东茶叶主产区土壤-茶叶中重金属污染特征与健康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(8): 1174-1182.
- GAO R H, GAO Y X, DONG F G, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal pollution in soil and tea in the main tea producing areas of Jiaodong, China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(8): 1174-1182.
- [10] 孙延斌, 孙婷, 董淑香, 等. 污染指数法在乳制品重金属污染评价中的应用研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(4): 441-446.
- SUN Y B, SUN T, DONG S X, et al. Application of pollution index method in the evaluation of heavy metal pollution in dairy products[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(4): 441-446.
- [11] 联合国粮农组织, 世界卫生组织. 食品中化学物风险评估原则和方法[M]. 刘兆平, 李凤琴, 贾旭东等译. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 227-229.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food [M]. Translated by Liu ZP, Li FQ, Jia XD, etc.. Beijing: People's Medical Publishing House Co., LTD, 2012: 227-229.
- [12] 刘元宝, 王灿楠, 吴永宁, 等. 膳食暴露定量评估模型及其变异性不确定性研究[J]. 中国卫生统计, 2008(1): 7-9, 14.
- LIU Y B, WANG C N, WU Y N, et al. Quantitative model of dietary exposure assessment and analysis for the variability and uncertainty [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2008(1): 7-9, 14.
- [13] FAO/WHO. Safety evaluation of certain contaminants in food [R]. World Health Organization, 2011(8): 153-316.
- [14] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain food additives and contaminants [R]. 2011 (64): 381-497.
- [15] EFSA Scientific Committee. Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food [J]. The European Food Safety Authority Journal, 2012, 10(12): 2985.
- [16] FAO/WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants [R]. World Health Organization Technical Report Series, 2011 (64): 305-380.
- [17] BENFORD D, CECCATELLI S, COTTRILL B, et al. Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water -EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) [J]. European Food Safety Authority Journal, 2014, 12(3): 3595: 1-261.
- [18] The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Chemical risks and JECFA: sulfur dioxide [EB/OL]. (2006) [2019-08-14]. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/Monograph1/Additive-448.pdf.
- [19] World health organization food and agriculture organization of the united nations. pesticide residues in food 2009: Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues [R]. Rome: World Health Organization, 2009.
- [20] CABRERA L C, PASTOR P M. The 2019 European Union report on pesticide residues in food [J]. European Food Safety Authority Journal, 2021, 19(4): 64-69.
- [21] 高俊全, 李筱薇, 赵京玲. 2000年中国总膳食研究: 膳食铅、镉摄入量[J]. 卫生研究, 2006, 35(6): 750-754.
- GAO J Q, LI X W, ZHAO J L. 2000 Chinese total diet study—The dietary lead and cadmium intakes [J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(6): 750-754.
- [22] 李筱薇, 高俊全, 陈君石. 2000年中国总膳食研究——膳食汞摄入量[J]. 卫生研究, 2006, 35(3): 323-325.
- LI X W, GAO J Q, CHEN J S. Chinese total diet study in 2000—the dietary mercuric intakes [J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(3): 323-325.
- [23] Codex Alimentaries Commission. Codex Alimentarius Commission: procedural manual, 28th ed [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, 2023.
- [24] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002(4): 63-64.
- WANG X Q, WU Y N, CHEN J S. The processing of low-level data on food contaminants monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278-279.
- [25] 郭佳欣, 谢佳, 蒋丽施, 等. 天麻保健食品开发现状分析[J]. 中草药, 2022(7): 2247-2254.
- GUO J X, XIE J, JIANG L S, et al. Analysis of the development status of Gastrodia elata health food [J]. Chinese Herbal Medicine, 2022(7): 2247-2254.
- [26] 云南省人民政府. 我省推动林草生态资源转化为经济优势发展优势——以绿为底绘就乡村振兴新风景 [EB/OL]. (2024-06-14) [2024-07-14]. https://www.yn.gov.cn/ywdt/zsdt/202404/t20240414_298070.html.
- Yunnan Provincial People's Government Our province promotes the transformation of forest and grass ecological resources into economic advantages and development advantages - painting a new landscape of rural revitalization with green as the background [EB/OL]. (2024-06-14) [2024-07-14]. https://www.yn.gov.cn/ywdt/zsdt/202404/t20240414_298070.html.
- [27] 刘焱, 金传山, 张亚中, 等. 天麻产地加工方法与质量评价研究进展[J]. 世界中医药, 2024, 19(5): 727-735.
- LIU Y, JIN C S, ZHANG Y Z, et al. Research progress on processing methods and quality evaluation of Tianma in production areas [J]. World Journal of Traditional Chinese Medicine, 2024, 19(5): 727-735.
- [28] 黄小兰, 谭春蓉, 朱德文, 等. 食药两用物质天麻、灵芝的外源性污染物分析[J]. 化学试剂, 2024, 46(3): 73-80.

- HUANG X L, TAN C R, ZHU D W, et al. Analysis of exogenous pollutants in *Gastrodia elata* and *Ganoderma lucidum* which dual use substances for food and medicine[J]. *Chemical Reagent*, 2024, 46(3): 73-80.
- [29] 包汇慧, 纪晓宁, 吴难, 等. 9种药食同源物质重金属及农药污染状况 Meta 分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(12): 1695-1703.
- BAO H H, JI X N, WU N, et al. Meta analysis of heavy metal and pesticide contamination status of 9 medicinal and edible homologous substances [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(12): 1695-1703.
- [30] 王海, 程云, 余高. 天麻品质分析和重金属含量评价[J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(12): 58-62.
- WANG H, CHENG Y, YU G. Quality analysis and heavy metal content evaluation of *Tianma* [J]. *Anhui Agricultural Bulletin*, 2024, 30(12): 58-62.
- [31] 李贝, 况玉, 杨高涵, 等. 快速检测中药材外源污染物二氧化硫残留量的新方法研究[J]. *中国现代应用药学*, 2022(9): 1-9.
- LI B, KUANG Y, YANG G H, et al. A new method for rapid detection of sulfur dioxide residues in exogenous pollutants in traditional Chinese medicine [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2022(9): 1-9.
- [32] 周茂嫦, 李恒谦, 柳敏, 等. 天麻病虫害及其防治研究进展[J]. *中南农业科技*, 2024, 45(1): 230-235.
- ZHOU M C, LI H Q, LIU M, et al. Research progress on *Gastrodia elata* diseases and pests and their control[J]. *Zhongnan Agricultural Science and Technology*, 2024, 45(1): 230-235.
- [33] 毛伟峰, 隋海霞, 刘爱东, 等. 累积风险评估方法在典型人群饮料中铅和镉联合暴露评估中的应用[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 18(3): 307-311.
- MAO W F, SUI H X, LIU A D, et al. Application research of cumulative risk assessment on combined exposure of lead and cadmium in beverages in typical beverage consumers [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2018, 18(3): 307-311.
- [34] 左甜甜, 方翠芬, 金红宇, 等. 靶器官毒性剂量法在玉竹中铅、镉和砷联合暴露评估中的应用[J]. *中国新药杂志*, 2022, 31(7): 639-644.
- ZUO T T, FANG C F, JIN H Y, et al. Application of target-organ toxic dose modification of HI method in the assessment of combined exposure to lead, cadmium and arsenic in *Polygonatum odoratum* (Mill) Druce [J]. *Chinese Chinese Journal of New Drugs*, 2022, 31(7): 639-644.