DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251106001
引用格式: 康茂约, 张崇生, 张晶, 等. 轮作模式下多种农作物 8 种重金属的富集特征与膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 335–343.
KANG MY, ZHANG CS, ZHANG J, *et al*. Enrichment characteristics and dietary risk assessment of 8 kinds of heavy metals in multiple crops under rotation planting systems [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 335–343. (in Chinese with English abstract).

轮作模式下多种农作物 8 种重金属的富集特征与膳食风险评估

康茂约[1#], 张崇生[1#], 张　晶[1], 陈芳芳[1], 方道赠[1], 倪　赞[2], 陈满玲[3], 刘建丽[3*]

(1. 温州市食品药品检验科学研究院, 温州　325000; 2. 温州市医药创新和审评中心, 温州　325000;
3. 温州市质量技术检测科学研究院, 温州　325000)

摘　要: 目的　研究同一地块中轮作种植下不同农作物对 Pb、As、Cd、Cr、Ni、Sn、Sb、Tl 等 8 种重金属的富集特征及膳食健康风险。**方法**　2023–2025 年间系统采集该地块 38 种轮作种植的农作物样品, 测定其重金属含量, 系统解析其富集特征与差异, 依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定的限值进行安全评价, 并运用每日摄入量(estimated daily intake, EDI)、目标危害商数(target hazard quotient, THQ)和总致癌风险(total carcinogenic risk, TCR)模型评估成人与学龄前儿童的暴露风险。**结果**　农作物中重金属富集能力呈现明显类别与元素特异性。Pb、Cd 在叶菜类(如生菜、油麦菜等)中富集较强; Ni 在豆类(如蚕豆、豌豆)中相对易富集; Sn 相对高富集于叶菜类(黄芽菜、油冬菜等)与部分芸薹类; As、Cr 在叶菜类中也具有一定富集能力, 但总体污染水平较低; Sb 与 Tl 未出现明显积累。风险评估显示, 多种作物(如生菜、菠菜、茄子、油麦菜、芹菜)对 Cd 存在潜在致癌风险(TCR>10^{-4}), 生菜中的 Pb、Cd 对儿童构成潜在非致癌风险(THQ>1), 豆类对 Ni 的暴露风险相对较其他农作物突出, 特别是蚕豆对儿童与成人均构成潜在非致癌风险等。**结论**　本研究表明, 在同地块轮作种植中, 不同农作物对重金属的富集特征与健康风险存在明显差异。为保障农产品安全与健康膳食, 建议在农田源头推行基于作物的分级管控策略, 规避、限制重金属高富集品种, 推广种植重金属低积累品种, 并通过膳食指南引导公众(尤其是儿童)合理消费, 构建从种植到食用的全链条安全健康防护体系。

关键词: 重金属; 富集特征; 膳食风险评估; 目标危害商数; 总致癌风险; 农产品安全

收稿日期: 2025-11-06
基金项目: 温州市重大科技项目(ZN2021002); 2024 年度温州市基础性农业科技项目(N20240017); 温州市市场监督管理局科技计划项目(2023006)
#康茂约和张崇生为共同第一作者
第一作者: 康茂约(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为食品质量安全分析。E-mail: 103957811@qq.com
张崇生(1974—), 男, 主任药师, 主要研究方向为食品药品质量安全分析。E-mail: 1018763742@qq.com
***通信作者:** 刘建丽(1990—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品质量安全分析。E-mail: 450224040@qq.com

Enrichment characteristics and dietary risk assessment of 8 kinds of heavy metals in multiple crops under rotation planting systems

KANG Mao-Yue[1#], ZHANG Chong-Sheng[1#], ZHANG Jing[1], CHEN Fang-Fang[1], FANG Dao-Zeng[1], NI Zan[2], CHEN Man-Ling[3], LIU Jian-Li[3*]

(1. *Wenzhou Institute for Food and Drug Control*, *Wenzhou* 325000, *China*; 2. *Wenzhou Center for Medical Innovation and Evaluation*, *Wenzhou* 325000, *China*; 3. *Wenzhou Technical Testing Research Institute for Quality*, *Wenzhou* 325000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the enrichment characteristics and dietary health risks of 8 kinds of heavy metals (Pb, As, Cd, Cr, Ni, Sn, Sb, Tl) in various crops under rotational planting in the same field. **Methods** From 2023 to 2025, a total of 38 kinds of rotationally planted crop samples were systematically collected from the field. The heavy metal content was measured, and their enrichment characteristics and differences were analyzed. The monitoring results were evaluated based on the limits specified in the GB 2762—2022 *National food safety standards-Limits of contaminants in food* and the exposure risks for adults and preschool children were assessed using the estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ) and total carcinogenic risk (TCR) models. **Results** The enrichment capacity of heavy metals in crops exhibited significant category- and element-specific characteristics. Pb and Cd showed stronger enrichment in leafy vegetables (*e.g.*, lettuce, youmai cabbage, *etc*); Ni was relatively highly enriched in legumes (*e.g.*, broad beans, peas); Sn was relatively highly enriched in leafy vegetables (*e.g.*, yellow sprout cabbage, youdong cabbage) and some brassica vegetables; As and Cr also demonstrated certain enrichment capabilities in leafy vegetables, though overall pollution levels were low; no significant accumulation of Sb or Tl was observed. Risk assessment indicated that multiple crops (*e.g.*, lettuce, spinach, eggplant, youmai cabbage, celery) showed potential carcinogenic risks for Cd (TCR>10^{-4}). Pb and Cd in lettuce pose potential non carcinogenic risks to children (THQ>1). The exposure risk of Ni from legumes was relatively higher than that from other crops. In particular, broad beans posed a potential non-carcinogenic risk to both children and adults. **Conclusion** This study indicates that there are significant differences in the enrichment characteristics and health risks of heavy metals among different crops in crop rotation on the same plot. To ensure the safety of agricultural products and a healthy diet, it is recommended to implement a crop based graded control strategy at the source of farmland avoid and restrict high accumulation varieties of heavy metals, and promote the cultivation of low-accumulation crop varieties; and guide public consumption, especially for children, through dietary guidelines. This approach will help establish a full-chain health protection system from planting to consumption.

KEY WORDS: heavy metals; enrichment characteristics; dietary risk assessment; target hazard quotient; total carcinogenic risk; agricultural product safety

0 引 言

随着我国工农业的快速发展，土壤重金属污染问题日益凸显，已成为威胁农产品质量安全、生态系统健康与人体健康的重大环境问题之一[1–2]。Pb、As、Cd、Cr 等重金属可通过根系吸收在农作物可食部位富集，并经由膳食链在人体内累积，长期暴露可引发慢性中毒，甚至具有致癌、致畸、致突变的风险，对儿童生长发育影响巨大[3–4]。因此，农产品重金属污染与膳食暴露风险评估一直是环境科学与食品安全领域的研究热点。

目前，国内外学者就单一农作物对特定重金属的富集能力与机制开展了广泛研究，普遍认为作物对重金属的富集特征存在明显的“作物-元素”特异性[5–6]。例如，叶菜蔬菜对 Cd、Pb、Cr 具有较强的富集能力[5–8]。然而，现有研究多聚焦于单一作物或单一生长季的静态评价，致使难以全面揭示轮作系统中多种重金属的复合污染风险及其动态富集规律。在农业生产实践中，轮作是一种普遍采用的种植制度，对于维持土壤肥力、减少病虫害具有重要意义[9–11]。但值得注意的是，在同一地块中，前后茬轮作的不同农作物，因其生理特性、根系形态及元素需求各异，可能对土壤中多种重金属产生差异化的吸收与富集行为，从而导致其复合污染风险呈现动态变化[10]。目前，关于轮作

模式下多种农作物对多种重金属的富集规律及其膳食风险的系统研究尚显不足, 这限制了对农田土壤安全利用与种植结构优化的精准指导。

此外, 风险评估对象的选择至关重要。学龄前儿童因其生理机能尚未发育完全、单位体重食物摄入量高, 对重金属的暴露更为敏感, 其健康风险通常远高于成人[1,12–14]。然而, 在现有的膳食风险评估中, 针对这一脆弱群体的针对性研究仍相对缺乏, 亟需将成人与学龄前儿童进行对比评估, 以提供更具人群针对性的风险管控建议[1]。

基于此, 本研究选取典型轮作区域, 以 Pb、As、Cd、Cr、Ni、Sn、Sb、Tl 等 8 种重点关注重金属为目标污染物, 系统监测与分析轮作模式下叶菜类、块根和块茎类、鳞茎类、豆类、瓜果类等多种农作物对重金属的富集特征。本研究旨在系统阐明不同农作物对多种重金属的富集特征与差异性; 基于食品安全国家标准评估其食用安全性; 综合运用每日摄入量(estimated daily intake, EDI)、目标危害商数 (target hazard quotient, THQ) 与总致癌风险 (total carcinogenic risk, TCR)模型, 评估经由该类作物摄入重金属对成人与学龄前儿童的膳食暴露风险[4,15–17]。通过控制土壤基质的一致性, 重点探究同地块轮作系统中不同作物对重金属的迁移转化行为与富集规律、膳食暴露与人群差异, 为推动区域种植结构优化、实施作物分级管控以及制定精准化膳食指南和安全饮食提供关键的数据支撑和理论依据。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂

NexION 2000 电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)、Optima 8000 电感耦合等离子体光谱仪(inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES)(美国 PerkinElmer 仪器公司); Mars6 微波消解仪(美国 CEM 公司); GSN-20 石墨赶酸仪(广州基创仪器有限公司); IQ 7000 Mill-Q 超纯水仪(德国默克集团 Millipore SAS 公司); BSA223S 电子天平(精度 0.001 g, 德国赛多利斯公司)。

65%硝酸(优级纯, 德国默克股份两合公司); Pb、As、Cr 标准品(质量浓度 1000 μg/mL, 国家计量院); Cd、Ni、Sn、Sb、Tl(质量浓度 1000 μg/mL, 北京坛墨质检科技有限公司)。

1.2　实验材料

本研究基于华东地区同一典型轮作种植地块, 于 2023—2025 年开展了长期定位监测, 所有 38 种农作物样本(至少 2~3 批次)均采自该固定地块内的轮作系统, 以确保土壤基质的一致性, 排除异质土壤环境对农作物重金属富集评估的干扰。依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》对轮作种植的农作物进行分类, 详见表 1。

表 1　轮作系统中种植的农作物类型

Table 1　Crop species sampled in the rotation system

农作物类型	具体品种
叶菜蔬菜	香菇菜、油冬菜、油麦菜、生菜、菠菜、皇帝菜、黄芽菜
豆类蔬菜	豇豆、豌豆、蚕豆、四季豆
芸薹类蔬菜	芥菜、包菜、紫甘蓝、花菜
茎类蔬菜	芹菜
块根和块茎蔬菜	薯类: 番薯、马铃薯、参薯(白参薯、红参薯)
	其他: 胡萝卜、白萝卜、芋头
鳞茎类蔬菜	葱、韭菜
瓜果类蔬菜	蒲瓜、黄瓜、南瓜、棱角丝瓜、白啄瓜
茄果类蔬菜	辣椒、茄子
谷物	水果玉米、紫玉米、糯玉米
水果	桑葚、草莓、西瓜

1.3　实验方法

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》规定, 定量称取粉碎机研磨后的样品, 加入 10 mL 硝酸进行预消解(预消解条件: 120 ℃ 20 min: 其中升温 10 min, 保持 10 min)。取出聚四氟乙烯管冷却至室温, 置于微波消解仪进行微波消解(仪器功率 1600 W, 升温到 180 ℃, 升温时间 20 min 并保持 30 min)。冷却后取出, 置于赶酸仪上赶酸(赶酸条件: 165 ℃, 升温 10 min, 保持 40 min)。冷却后用超纯水定容至 50 mL, 摇匀待测, 同时做空白试验。

ICP-MS 仪器条件: 射频功率 1600 W; 等离子体气流量 15 L/min; 雾化气流量 1.05 L/min; 蠕动泵速率 35 r/min; 碰撞池模式, 氦气流速: 3 mL/min; Cr 的内标为 Sc, Cd、Sn、Sb 的内标为 In, As、Ni 的内标为 Ge, Pb、Tl 的内标为 Bi。

ICP-OES 仪器条件: 射频功率 1300 W, 等离子体气流量 15 L/min, 辅助气流量 0.2 L/min, 雾化气流量 0.55 L/min, 进样速率 1.50 mL/min; Pb 分析谱线波长 220.353。

1.4　判断依据

参考 GB 2762—2022 农作物的 Pb、As、Cd、Cr 规定限量值进行判定, 超出限量值的判定为不合格, 各类农作物中重金属标准限值如表 2 所示。

1.5　膳食风险评估

参考美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)健康风险模型, 采用其综合风险信息系统确定的重金属参考剂量(oral reference dose, RfD)和致癌斜率因子(slope factor, SF), 对 Pb、Cd、Cr、Ni 等重金属经膳食途径所致的暴露水平开展膳食风险评估[4,15–19]。

1.5.1　摄入量评估

各农作物的每日摄入量以浙江省疾病预防控制中心发布的 2024 年居民膳食摄入量为基准, 鉴于葱、韭菜、辣

表 2 各农作物重金属限值(mg/kg)
Table 2 Heavy metal limits in various crops (mg/kg)

农作物类型	Pb	As	Cd	Cr
叶菜蔬菜	0.3	0.5	0.2	0.5
豆类蔬菜	0.2	0.5	0.1	0.5
芸薹类蔬菜	0.2	0.5	0.05	0.5
块根和块茎蔬菜	0.1	0.5	0.1	0.5
茎类蔬菜	0.1	0.5	0.2	0.5
薯类	0.2	0.5	0.05	0.5
麟茎类蔬菜	0.1	0.5	0.05	0.5
瓜果类蔬菜	0.1	0.5	0.05	0.5
辣椒	0.1	0.5	0.05	0.5
茄子	0.1	0.5	0.05	0.5
谷物(玉米)	0.2	0.5	0.1	1.0
水果	0.1	-	0.05	-

注: -为未规定限值。

椒等在日常膳食中主要作为调味品使用, 其摄入量则参考《中国食物成分表》中的建议值进行设定[20]。同时按公式(1)计算各类重金属的 EDI。

$$EDI=\frac{C\times IRD\times E_f\times E_d}{BW\times AT}\times10^{-3} \quad (1)$$

式中: EDI 为每日估计摄入量, mg/(kg·d); C 为重金属的含量, mg/kg; IRD 为该类食品的每人每日摄入量(daily intake rates), g/(d·人), 具体见表 3; BW 为平均体重(body weight), 成人为 64 kg, 学龄前儿童 19.1 kg[21]; E_f 为暴露频率, 365 d/年; E_d 为暴露时间, 70 年; AT 为平均接触非致癌物时间(average exposure time), $E_f\times E_d$, 70×365 d。

表 3 各农作物 IRD 参考值
Table 3 Reference values of IRD

农作物类别	成人 IRD/g	学龄前儿童 IRD/g
蔬菜	264	186
薯类	270	220
谷物	270	220
水果	50	50
麟茎类蔬菜(葱、韭菜、香菜)、辣椒	20~50	20~50

1.5.2 目标危害系数评估

使用 THQ 模型对农作物中的 Pb、Cd、Cr、Ni 进行健康风险评估, 通过公式(2)计算 THQ 以评估非致癌风险。当 THQ≤1 时, 表示暴露量未超过不良反应阈值,说明健康风险较低; 当 THQ≥1 时, 表明暴露人群很可能面临健康风险, 值越大, 健康风险越高[22−23]。

$$THQ=\frac{EDI}{RfD} \quad (2)$$

式中: THQ 为目标危害系数; RfD 为经口摄入参考计量, mg/(kg·d), 各重金属 RfD 摄入参考值见表 4[15]。

表 4 各重金属元素 RfD 参考值[mg/(kg·d)]
Table 4 Reference values of RfD for each heavy metal element [mg/(kg·d)]

重金属	RfD
Pb	0.0014
As	0.0003
Cd	0.0005
Cr	0.0030
Ni	0.0054
Sb	0.0004

1.5.3 致癌风险评估

使用 TCR 模型对农作物中的 Pb、Cd 进行致癌风险评估[3,22], 具体计算见公式(3)。当 TCR<1×10^{-6} 时, 致癌风险较低或无致癌风险; 当 1×10^{-6}<TCR<1×10^{-4} 时, 低或可接受致癌风险; 当 1×10^{-4}<TCR<5×10^{-4}; 中致癌风险, 当 TCR>5×10^{-4}, 高致癌风险。

$$TCR=EDI\times SF \quad (3)$$

式中: SF 为参考美国环保局 US EPA 制定的致癌斜率因子(slope factor), mg/(kg·d)。各元素的致癌斜率因子分别为 Pb: 0.0085、Cd: 0.38[24]。

1.6 数据处理

各数据参照 GB 5009.268—2016 方法计算, 结果以均值表示, 低于方法检出限的目标物均被判定为未检出。ICP-MS 采用 2.3 版 Syngistix ™ 软件对样品进行采集分析和数据处理分析; ICP-OES 采用 5.1 版 Winlab32 for ICP 版软件对样品进行采集分析和数据处理分析; 采用 Origin 2024 软件进行绘图, 采用 WPS Office 2024 进行数据表格制作及统计分析。

2 结果与分析

2.1 重金属含量及富集差异分析

为系统揭示该地块轮作体系中重金属的迁移富集规律, 本研究对多种代表性农作物进行了持续监测。结果表明, 不同农作物对重金属的富集能力存在明显的类型与元素特异性。特定作物类别对特定元素呈现独特富集偏好, 叶菜类蔬菜对多种重金属表现出普遍且较强的富集能力。

2.1.1 不同农作物富集特性

叶菜类蔬菜(如生菜、黄芽菜、菠菜、油麦菜、油冬菜、香菇菜等)是多种重金属的共性富集载体, 尤其对 Pb、Cd、Cr、Ni、Sn 均呈现相对较高的富集倾向, 具体分布规律见图 1、2。这主要源于其共有的生理与形态学特性: 生

长周期短、生物量大，以及须根系密集分布于重金属易富集的耕层土壤。更为关键的是，其叶片作为主要的光合与蒸腾器官，表面积大且蒸腾作用极为旺盛，形成了强大的水分拉力和木质部运输流。这些特性协同作用，不仅明显促进了重金属离子从土壤溶液向根表的被动扩散与主动吸收，更驱动了重金属在植物体内随蒸腾流而实现长距离运输，并最终汇集于叶片器官中并大量积累[5,25–27]。因此，旺盛的蒸腾作用可能是导致重金属在叶菜可食用部位中富集的关键途径。

豆类蔬菜对 Ni 的富集能力独特且明显，其平均含量远高于其他作物类别。而瓜果类(黄瓜、南瓜)、块根和块茎类(胡萝卜、白萝卜)、水果(草莓、西瓜)及谷物(玉米)等重金属整体相对较低。

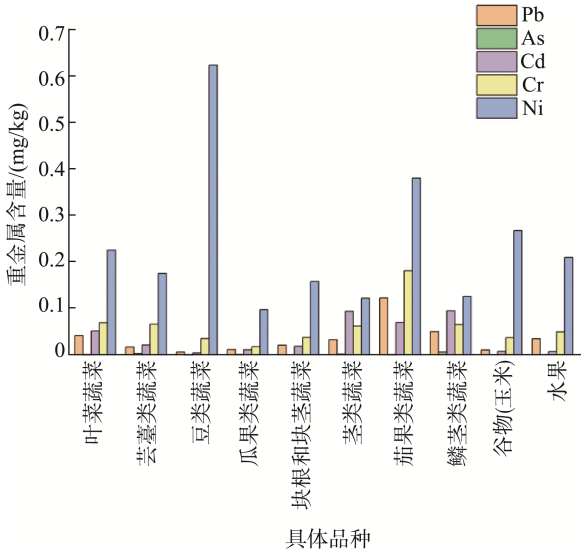


图 1　不同类型农作物间不同重金属含量富集差异

Fig.1　Differences in different heavy metal content enrichment among different types of crops

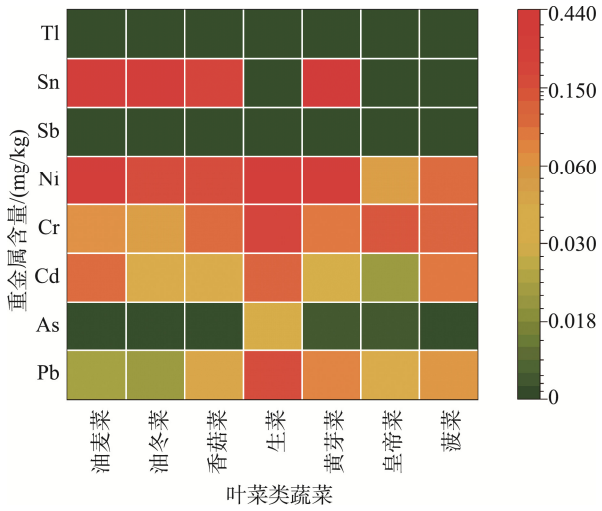


图 2　叶菜类蔬菜 8 种重金属富集情况

Fig.2　Accumulation of 8 kinds of heavy metals in leafy vegetables

2.1.2　不同重金属的富集特征

Pb 的富集特征：监测结果显示，花椒、生菜、黄芽菜、香菜等作物对 Pb 表现出相对较强的富集能力，具体见图 3。值得注意的是，香菜均值在限值附近，部分批次香菜超过限值；番薯和土豆的不同品种在 Pb 富集上存在明显的种内差异，这可能受品种特异性基因调控的吸收与转运效率影响[26,28]。相比之下，豆类蔬菜、谷物(如玉米)、瓜果类及茄果类作物的 Pb 含量普遍处于较低水平，表明其根系对 Pb 的吸收效率较低，或从根部向可食用部位的转运能力较弱，属于 Pb 低富集型作物。

Cd 的富集特征：紫甘蓝、芹菜、菠菜、油麦菜、生菜以及部分茄果类与鳞茎类作物(如茄子、葱、香菜及某些辣椒品种)对 Cd 的富集能力较强。其中，葱、茄子及部分辣椒的 Cd 含量甚至超过食品安全限量标准，而辣椒品种间的种内差异可能是导致部分样品超标的重要原因[29]。与此形成对比的是，豆类蔬菜、水果、谷物(如玉米)及大多数瓜果类蔬菜的 Cd 含量较低，显示出其对 Cd 的吸收与转运能力有限。

Cr 的富集特征：研究发现，花椒、生菜、芥菜、桑葚、香菜等作物的 Cr 含量相对高于其他监测作物。尤其是在叶菜类和芸薹类蔬菜中，Cr 的富集现象较为明显。值得关注的是，像香菇菜和芥菜这类品种繁多的作物，其不同品种间的 Cr 富集能力也存在一定差异，再次印证了遗传背景对重金属积累的影响[30]。

Ni 的富集特征：豆类蔬菜对 Ni 的富集能力极为突出，其平均含量明显高于其他所有作物类别，形成了独特的“Ni—豆类”富集对；此外茄果类(如花椒、辣椒)、谷物(玉米)、叶菜类(如油麦菜、黄芽菜与生菜)以及芸薹类(如花菜)等作物属于 Ni 中等富集群组。而茎类、瓜果类、鳞茎类蔬菜以及水果(如草莓、西瓜)和部分根茎类作物(如胡萝卜、白萝卜)的 Ni 含量则较低，表明这些作物对 Ni 的吸收与转运能力极弱，属于 Ni 低富集型作物。

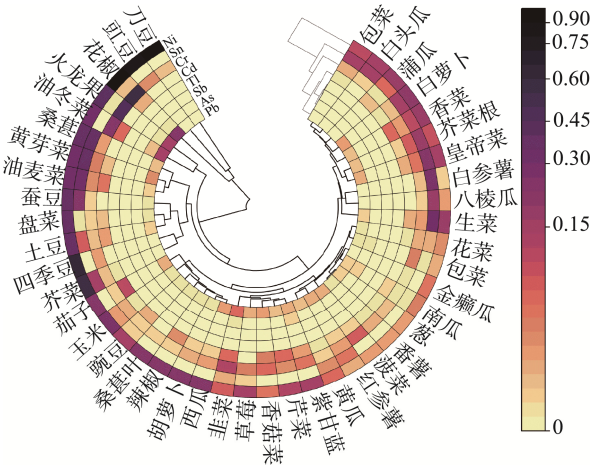


图 3　不同品种间农作物不同重金属含量富集差异

Fig.3　Differences in different heavy metal content enrichment among different crop varieties

2.1.3 低含量重金属的富集特征

本研究对 Sb 和 Tl 的同步监测数据显示，所有农作物样品中这两种元素的含量均稳定处于当地环境背景值范围之内，在各类作物的可食用部位均未观察到明显的生物富集现象，具体见表 3。这一结果与 As、Sn 等元素的监测趋势一致—这些元素在监测作物中的整体含量也维持在较低水平(除锡在叶菜类(黄芽菜、油冬菜等)与部分芸薹类蔬菜中呈现相对较高富集外)。综合多项元素的评估结果可知，在当前地块的生产条件与轮作体系下，农作物对 Sb、Tl、As、Sn 等元素的吸收与累积能力总体较弱，尚未表现出明显的特异性富集趋势。因此，初步判断由这些元素通过本土农作物途径引发的直接膳食安全风险较低，该地块的重金属风险关注点更集中于 Pb、Cd 等已显示较强富集能力与超标潜在风险的元素。

2.2 重金属安全及风险评估

为系统评估重金属的膳食健康风险，本研究针对 Pb、Cd、Cr、Ni 等重金属，筛选了其富集系数相对较高的代表性农作物，基于 EDI、THQ 与 TCR 等指标，系统评估成人与学龄前儿童的暴露水平与风险程度，旨在识别主要风险来源，为制定优先管控策略与针对性膳食指南提供科学依据。

2.2.1 Pb 安全及风险评估

通过对该区域农作物 Pb 含量的持续监测，本研究系统评估了其膳食安全性与健康风险。在污染物水平方面，所有监测农作物的 Pb 含量均符合 GB 2762—2022 标准，表明农作物 Pb 质量安全状况总体可控。然而采用目标危害商数与致癌风险模型进行评估的结果显示，尽管多数作物的健康风险处于可接受范围内，但生菜所呈现的非致癌风险需引起重视。具体而言，部分香菜 Pb 含量超过限值，但由于香菜属于调味类蔬菜，膳食摄入量较低，因此其 THQ、TCR 值均处于较低水平。而生菜对学龄前儿童群体的 THQ 值已超过安全阈值(THQ>1)，表明存在潜在非致癌健康风险，具体见图 4。在致癌风险方面，图 5 中可发现，大部分农作物 TCR 值介于 1×10^{-6} 至 1×10^{-4} 之间，甚至更低，属于可接受的安全范围，而生菜的 TCR 值尤其对学龄前儿童造成的安全风险则相对较高。

2.2.2 Cd 安全及风险评估

通过对该区域农作物 Cd 含量的持续监测，本研究系统评估了其膳食安全性与健康风险，图 6~7。结果表明，该地块轮作种植下葱、茄子以及部分批次的辣椒超过 GB 2762—2022 中规定的限值，存在明确的食品安全风险。研究显示，除已明确超标的葱、茄子及部分批次辣椒外，对 Cd 具有较强富集能力的紫甘蓝、芹菜、菠菜、油麦菜、生菜以及部分茄果类与鳞茎类等作物，也成为膳食 Cd 暴露的重要潜在来源。基于 THQ 与 TCR 模型的评估进一步显示：在非致癌风险方面，茄子对成人与学龄前儿童均构成风险；紫甘蓝、

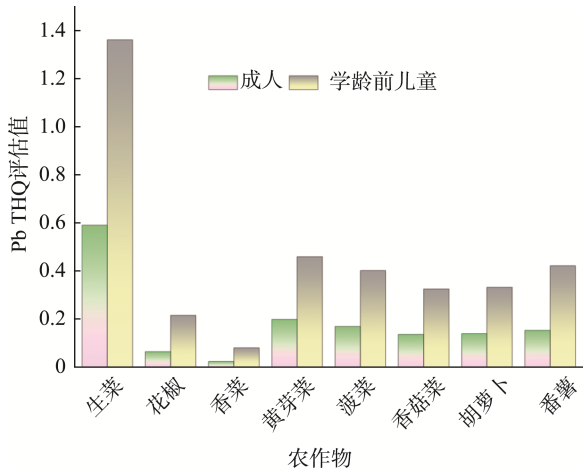


图 4 Pb 相对高富集农作物的 THQ 评估

Fig.4 THQ assessment of crops with relatively high Pb enrichment

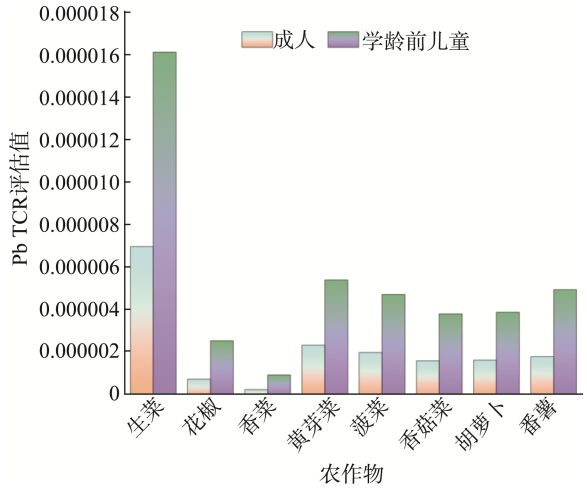


图 5 Pb 相对高富集农作物的 TCR 评估

Fig.5 TCR assessment of crops with relatively high Pb enrichment

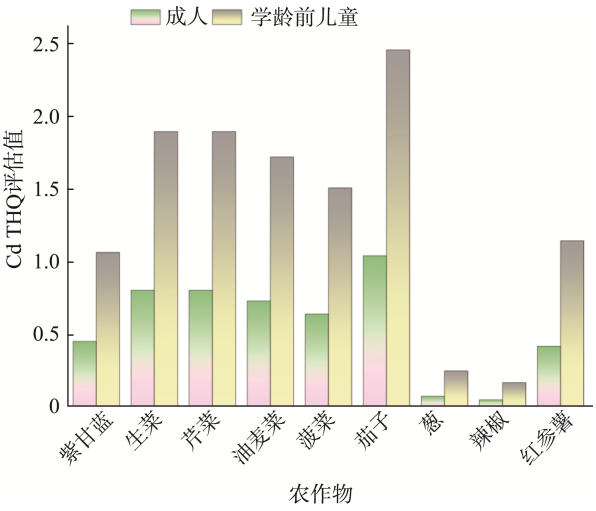


图 6 Cd 相对高富集农作物的 THQ 评估

Fig.6 THQ assessment of crops with relatively high Cd enrichment

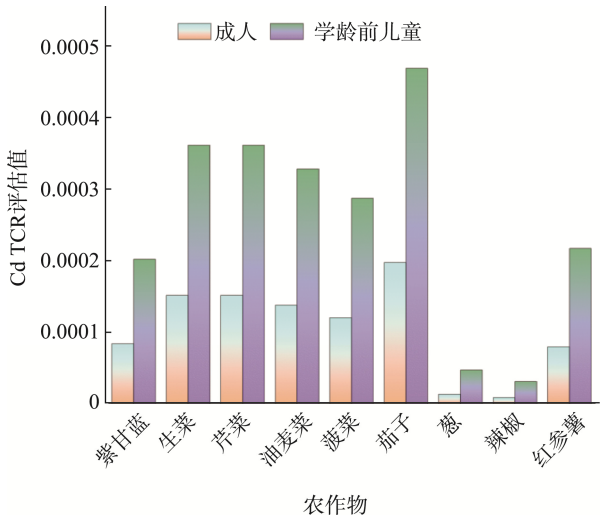


图 7　Cd 相对高富集农作物的 TCR 评估
Fig.7　TCR assessment of crops with relatively high Cd enrichment

生菜、油麦菜、芹菜和红参薯对学龄前儿童具有潜在风险, 对成人亦接近风险阈值。就致癌风险而言, 生菜、油麦菜、菠菜、芹菜和茄子对两类人群的 TCR 值均高于 1×10^{-4}, 显示中等潜在致癌风险。除此之外, 紫甘蓝、红参薯对学龄前儿童的 TCR 值高于 1×10^{-4}, 存在相应的潜在致癌风险。

2.2.3　Cr 安全及风险评估

通过对该区域农作物 Cr 含量的持续监测, 本研究系统评估了其膳食安全性与健康风险。结果表明, 该地块轮作种植下所有农作物均未超过 GB 2762—2022 中规定的限值。而从 THQ 模型膳食风险评估发现, 生菜、芥菜、花椒、香菜等 Cr 富集较高的农作物的 THQ 值均小于 1, 非致癌健康风险较低。值得注意的是, 生菜对学龄前儿童的非致癌风险(THQ 值)相对较高。其余监测农作物非致癌风险均较低, 具体见图 8。

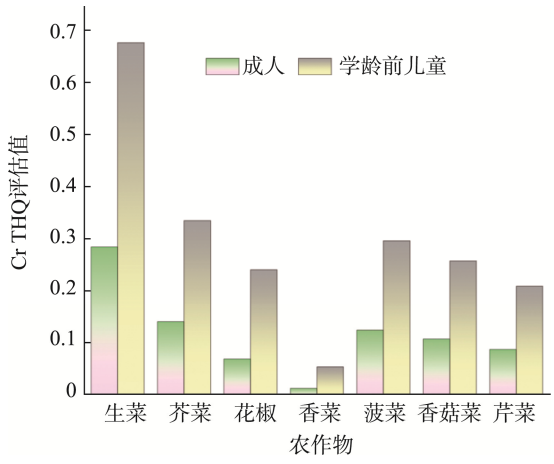


图 8　Cr 相对高富集农作物的 THQ 评估
Fig.8　THQ assessment of crops with relatively high Cr enrichment

2.2.4　Ni 安全及风险评估

通过对该区域农作物 Ni 含量的持续监测, 本研究系统评估了其膳食安全性与健康风险。由于 Ni 在 GB 2762—2022 中尚无规定农作物的限值, 故本研究不做限值判定。为明确 Ni 高富集农作物的膳食暴露风险, 本研究采用 THQ 模型进行评估。结果显示, 蚕豆对成人和学龄前儿童均表现稍高非致癌健康风险(THQ>1), 四季豆、豌豆对成人风险可接受, 但对学龄前儿童存在潜在风险(THQ>1)。其余监测农作物非致癌风险均较低, 具体见图 9。

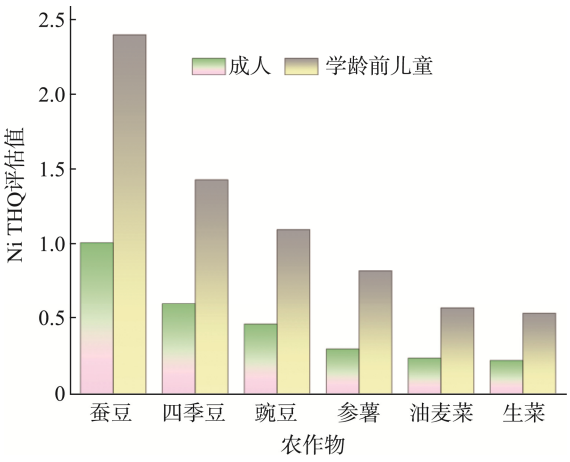


图 9　Ni 相对高富集农作物的 THQ 评估
Fig.9　THQ assessment of crops with relatively high Ni enrichment

3　结　论

本研究通过对典型轮作区农作物重金属富集特征的系统监测与膳食风险评估, 揭示了“元素-物种”特异性的积累规律, 并据此提出了风险导向的种植结构优化和健康膳食指南。研究发现, 叶菜类对 Pb、Cd、Cr、Ni、Sn 普遍表现出相对较强的富集能力, 豆类(如蚕豆、豌豆)则对 Ni 具有特异性高富集, 部分作物(如葱、茄子及部分辣椒)的 Cd 含量已出现超标等。风险评估进一步量化了由此带来的健康风险: 生菜对儿童构成潜在的 Pb、Cd 非致癌风险, 多种作物(如生菜、菠菜、茄子、油麦菜、芹菜)对 Cd 存在潜在致癌风险, 且学龄前儿童在所有评估场景中均表现出远高于成人的风险敏感性。

基于污染特征与风险量化结果, 本研究提出了“优先规避-审慎限制-积极推广”的分级种植管控策略。建议在该区域优先规避生菜等“广谱型”富集作物, 限制种植油麦菜、菠菜、茄子、蚕豆等特定重金属高富集作物, 转而推广种植水果(如草莓、西瓜等)、瓜果类、茎类蔬菜、块根和块茎类及谷物(玉米)等相对低富集作物。通过筛选低富集作物的模式, 在农业生产环节有效阻断重金属的膳食暴露途径, 实现农产品安全与健康膳食饮食。本研究形成了

一套从污染识别、风险量化到管控决策的完整方法，为类似农业产区的农产品安全生产与土地利用提供了可操作的实践参考。

参考文献

[1] LI CF, ZHOU KH, QIN WQ, *et al.* A review on heavy metals contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques [J]. Soil & Sediment Contamination, 2019, 28: 380–394.

[2] 张晓晨. 浙江典型城市表土重金属污染磁学监测与溯源[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2023.
ZHANG XC. Magnetic monitoring and traceability of heavy metal pollution in topsoil of typical cities in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2023.

[3] 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 WJ. *et al.* Pollution status and health risk assessment of heavy metals in grains in Wuxi City [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 420–425.

[4] 连莹莹, 丁国涛, 方彦飞, 等. 邯郸市 6 种常见蔬菜中农药与重金属残留检测及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 84–92.
LIAN YY, DING GT, FANG YF, *et al.* Detection and health risk assessment of pesticides and heavy metal residues in 6 kinds of common vegetables in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 84–92.

[5] 田志君, 何付兵, 姜昱聪, 等. 金矿开采活动区土壤-农作物系统重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7218–7225.
TIAN ZJ, HE FB, JIANG YC, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of soil-crop system in gold mine activity area [J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7218–7225.

[6] 曾庆良. 湖北省恩施市沙地乡富硒土地安全利用区划研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
ZENG QL. A dissertation submitted to China university of geosciences for master degree [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.

[7] 李霞雪. ICP-MS 法测定雅安市蔬菜中 Cr、As、Cd、Hg、Pb 含量及污染状况调查评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.
LI XX. Determination of Cr, As, Cd, Hg, Pb content in Ya'an vegetables by ICP-MS method and investigation and evaluation of contamination status [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.

[8] WANG BB, GAO F, QIN N, *et al.* A comprehensive analysis on source-distribution-bioaccumulation-exposure risk of metal(loid)s in various vegetables in peri-urban areas of Shenzhen, China [J]. Environmental Pollution, 2021. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118613

[9] ANN-BYBEE-FINLEY K, KATHERINE M, KATHRYN EW, *et al.* Rotational complexity increases cropping system output under poorer growing conditions [J]. One Earth, 2024, 7(9): 1638–1654.

[10] 陈玉敏. 轮作对重金属积累的影响及蒙古黄芪重金属污染健康风险评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
CHEN YM. The effect of rotation on accumulation of heavy metal and health risk assessment of heavy metal pollution in *Astragalus membranaceus* (Fisch.) BGE. var. mongholicus (BGE.) Hsiao [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.

[11] HUANG SH, RAO GH, UMAIR A, *et al.* Application of inorganic passivators reduced Cd contents in brown rice in oilseed rape-rice rotation under Cd contaminated soil [J]. Chemosphere, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127404

[12] 彭秀玲, 周洪印, 张敏, 等. 基于 GIS 的滇东地区耕地土壤重金属空间分布与蔬菜安全评估[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(6): 2025–2033.
PENG XL, ZHOU HY, ZHANG M, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in cultivated soils and vegetable safety assessment in eastern Yunnan based on GIS technology [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(6): 2025–2033.

[13] PRECIOUS JA, MIRIAM AB, ESI A. Heavy metal contamination in vegetables and associated health risks [J]. Scientific African, 2025. DOI: 10.1016/j.sciaf.2025.e02603

[14] SU CH, WANG JW, CHEN ZW, *et al.* Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China [J]. Science of the Total Environment, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159389

[15] 连莹莹, 方彦飞, 韩永红, 等. 邯郸市谷物制品中 26 种金属多元素监测与健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 157–166.
LIAN YY, FANG YF, HAN YH, *et al.* Monitoring and health risk assessment of 26 kinds of metal multi-elements in cereals in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 157–166.

[16] 周立强, 付贤杰, 刘贵荣, 等. 赤水虫茶中 8 种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, 2025, 16(10): 105–111.
ZHOU LQ, FU XJ, LIU GR, *et al.* Concentration characteristics and health risk assessment of 8 kinds of heavy metals in Chishui insect tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 105–111.

[17] 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, 16(18): 19–26.
XIANG J, TANG WL, DAI X, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in vegetables sold in Hunan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 19–26.

[18] MINASHREE K, ARUN K. Identification of component-based approach for prediction of joint chemical mixture toxicity risk assessment with respect to human health: A critical review [J]. Food and Chemical Toxicology, 2020. DOI:10.1016/j.fct.2020.111458.

[19] 栾崧, 杨忠芳, 郑国东, 等. 桂西地质高背景区自然和人为驱动下土壤重金属风险评估与来源解析[J/OL]. 生态毒理学报, 1-17. [2025-10-31]. https://link.cnki.net/urlid/11.5470.X.20251011.1047.004
LUAN S, YANG ZF, ZHENG GD. *et al.* Risk assessment and source apportionment of soil heavy metals under natural and anthropogenic drivers in a high geochemical background area, Western Guangxi, China [J/OL]. Asian Journal of Ecotoxicology, 1-17. [2025-10-31]. https://link.cnki.net/urlid/11.5470.X.20251011.1047.004

[20] 韩晋仙, 李二玲. 山西寿阳县玉米籽粒重金属含量及健康风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 160–165.

HAN JX, LI ERL. Heavy metal content and health risk assessment of corn kernels in Shouyang County, Shanxi Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 160–165.

[21] 王鼎南, 王扬, 戴一科, 等. 2021—2024 年浙江省淡水鱼和饮用水中地西泮污染水平和膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 329–336.
WANG DN, WANG Y, DAI YK, *et al*. Pollution level and dietary exposure risk assessment of diazepam in freshwater fish and drinking water in Zhejiang Province from 2021 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 329–336.

[22] ZHOU LQ, LIU WZ. Pollution of four heavy metal elements in dried chili peppers in Guizhou Province and its health risk assessment [J]. Scientific Reports, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-68564-8

[23] 马合勤, 张家烙, 黄嘉敏, 等. 广东省佛山市顺德区地产常见蔬菜重金属污染调查与评价[J]. 农产品质量与安全, 2024(3): 86–90.
MA HQ, ZHANG JL, HUANG JM, *et al*. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in common vegetables from Shunde District, Foshan City, Guangdong Province [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2024(3): 86–90.

[24] 庞洁, 梁善范, 唐琼, 等. 2021—2023 年南宁市居民主要食品重金属污染健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 215–222.
PANG J, LIANG SF, TANG Q, *et al*. Health risk assessment of heavy metal contamination in main food of Nanning City residents during 2021 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23): 215–222.

[25] 郭王子杰, 陈一博, 于雪泽, 等. 铅胁迫下早开堇菜的耐性及富集转运[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 338–351.
GUO WZJ, CHEN YB, YU XZ, *et al*. Tolerance, enrichment, and transportation of *Viola prionantha* under lead stress [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 338–351.

[26] 倪中应, 苏瑶, 汪亚萍, 等. 不同类型蔬菜重金属镉低积累品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11): 2486–2490.
NI ZY, SU Y, WANG YP, *et al*. Screening of low cadmium accumulation varieties in different types of vegetables [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(11): 2486–2490.

[27] 朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332–345.
ZHU Z, YANG XD, XU ZQ, *et al*. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 332–345.

[28] 陈涵, 胡慧云, 程建峰, 等. 不同基因型甘薯块根自然富集元素能力的差异性[J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 24–39.
CHEN H, HU HY, CHENG JF. *et al*. Differences in natural enrichment abilities of elements in root tubers of different genotypes of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(7): 24–39.

[29] 柴冠群, 蔡景行, 吴道明, 等. 十一个辣椒品种的镉富集和转运能力比较[J]. 南方农业, 2023, 17(9): 56–60, 74.
CHAI GQ, CAI JX, WU DM, *et al*. Comparison of cadmium accumulation and transport capabilities among eleven pepper varieties [J]. South China Agriculture, 2023, 17(9): 56–60, 74.

[30] 弭宝彬, 刘碧琼, 戴雄泽, 等. 不同基因型芥菜对 5 种重金属累积差异性研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(26): 40–49.
NI BB, LIU BQ, DAI XZ. *et al*. The accumulation of five heavy metals in different genotypes of *Brassica juncea*. Chinese [J] Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(26): 40–49.

(责任编辑: 蔡世佳　冯东慧)