

基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究

周旭, 周安琪, 曹红斌, 刘建伟, 陈艳姣, 张爱琛

引用本文:

周旭, 周安琪, 曹红斌, 等. 基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1213-1220.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1367>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宜昌近郊污水灌溉区水芹重金属污染状况及健康风险评价

张海锋, 李晓玲, 罗玉红, 戴泽龙, 胥焘, 黄应平

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1470-1477 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.006>

竹笋地土壤重金属污染潜在生态风险及食用笋健康风险评价

任传义, 程军勇, 张延平, 汤富彬, 倪张林, 屈明华

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 855-862 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1501>

酸与Cd污染农田的植物修复及健康风险评价

赵雪梅, 谢华, 吴开庆, 余孟好, 杨瑞刚, 李相林

农业环境科学学报. 2015(4): 702-708 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.014>

稳定化处理对底泥利用后土壤重金属形态及蔬菜重金属含量的影响

李翔, 刘永兵, 程言君, 臧振远, 罗楠, 王佳佳

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1278-1285 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.008>

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

冯英, 马璐瑶, 王琼, 吴英杰, 黄路宽, 周其耀, 杨肖娥

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2359-2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0787>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周旭, 周安琪, 曹红斌, 等. 基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1213–1220.

ZHOU Xu, ZHOU An-qi, CAO Hong-bin, et al. Safety limits of heavy metals in planted soil of Chinese cabbage based on health risk assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1213–1220.



开放科学 OSID

基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究

周旭^{1,2,3}, 周安琪^{1,2,3}, 曹红斌^{1,2,3*}, 刘建伟^{1,2,3}, 陈艳姣^{1,2,3}, 张爱琛^{1,2,3}

(1. 中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 天然药物教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 解决蔬菜的食用安全问题需要从源头上进行控制, 针对主栽蔬菜品种制定相应的种植土壤重金属安全限值保障蔬菜食用安全的有效手段。本文基于健康风险分析, 根据可接受健康风险水平、我国一般人群的蔬菜摄入量 and 所含重金属在膳食摄入量中的占比, 反推出保障人体健康不受危害的最低蔬菜摄入重金属的安全浓度。搜集大量研究数据, 拟合白菜吸收富集重金属的回归方程, 确定了白菜种植土壤中类金属 As 和重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 的安全限值。我国人群膳食摄入中由蔬菜摄入贡献的重金属在 12%~43% 不等, 在不同区域膳食摄入差别较大, 相同区域不同重金属间差异较大。蔬菜中具有致癌毒性的 As 和 Cr 的安全限值分别为 0.04 mg·kg⁻¹ 和 0.17 mg·kg⁻¹, 低于《食品安全国家标准 食品污染物限量》(GB 2762—2017); 白菜种植土壤中 As、Cr 和 Pb 的安全限值分别为 26、16 mg·kg⁻¹ 和 51 mg·kg⁻¹, 低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018), 其他 5 种重金属的安全限值则比国家标准更高。基于可接受人体健康风险推算的白菜产地重金属安全限值与我国现行土壤标准的比较, 白菜产地依据重金属种类的不同应该有更低或更高的土壤重金属标准限值。因而建议针对具体的蔬菜种类制定相应的种植土壤标准。

关键词: 健康风险分析; 蔬菜; 种植土壤; 重金属; 安全限量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1213-08 doi:10.11654/jaes.2019-1367

Safety limits of heavy metals in planted soil of Chinese cabbage based on health risk assessment

ZHOU Xu^{1,2,3}, ZHOU An-qi^{1,2,3}, CAO Hong-bin^{1,2,3*}, LIU Jian-wei^{1,2,3}, CHEN Yan-jiao^{1,2,3}, ZHANG Ai-chen^{1,2,3}

(1. Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Resources Protection and Utilization, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Natural Medicine, Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science of Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To ensure the safe consumption of vegetables, it is important to control pollutants at the growth source by setting species-specific safety limits for heavy metals in the planting soil. In this study, the maximum acceptable concentrations of metalloid As and heavy metals Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and Hg in vegetables were determined on the basis of acceptable health risk levels, daily vegetable intake, and the proportion of heavy metals in the vegetables against the total dietary intake for the general population in China. Large amounts of research data were collected to fit the absorption and enrichment equation of each element contained in Chinese cabbage plants, and the safety limits for these elements in the planting soil were determined. The results showed that the vegetables contributed 12% to 43% of heavy metals in

收稿日期: 2019-12-11 录用日期: 2020-03-08

作者简介: 周旭(1996—), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 从事土壤污染和投入品安全限量研究。E-mail: 201821051212@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 曹红斌 E-mail: caohongbin@bnu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800404)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD0800404)

the dietary intake, with the proportions differing among the elements. With the exceptions of As, Cr, and Pb, the estimated safety limits of heavy metals in vegetables were higher than those specified by the National Food Safety Standard Contaminant Limit in Food (GB 2762—2017). The estimated safety limits of As ($26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Cr ($16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and Pb ($51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the Chinese cabbage planting soil were lower than the corresponding limits set by the National Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618—2018). Therefore, it is necessary to develop soil standards for specific vegetable species.

Keywords: health risk analysis; vegetable; planting soil; heavy metal; safety limit

蔬菜在我国城乡居民膳食摄入食品中占有重要地位,仅次于谷物。随着城镇规模的扩大,蔬菜的规模化、集约化生产已经在我国日趋成熟,虽然蔬菜的产量可以满足居民需求,但是蔬菜的安全性问题却屡屡发生。蔬菜安全性问题主要体现在蔬菜的重金属超标以及农药残留两个方面。我国的蔬菜安全问题从20世纪90年代初期就有学者开展研究,蔬菜种植土壤中重金属的累积会导致蔬菜中重金属超标,进而引发一系列的人体健康问题^[1]。部分类金属如砷(As),对身体的各个器官组织有损伤毒害作用,并且具有致癌性和致畸性^[2]。因此,有必要对我国居民由于食用蔬菜摄入重金属所导致的健康风险进行分析并从源头进行控制。

中国现行土壤质量标准《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定了农用地土壤中重金属及类金属As的风险筛选值和管制值^[3-5],但该标准适用于所有的农用地,没有涉及到具体的农作物种类,因此土壤标准的普适性一直是学者关注和讨论的热点问题。不同作物对同一土壤污染物的富集系数差异显著^[6],许根焰等^[7]基于食品中污染物的安全限量标准反推贵州白菜种植土壤Cd的浓度,认为国家农用地标准对于贵州白菜地适用偏保守。可见,农作物种类不同,对种植土壤环境质量的要求不同,对连作品种的选择亦有不同。因此,针对主栽蔬菜品种制定相应的种植土壤安全限量标准,有利于科学利用不同环境质量的土壤,保障蔬菜食用安全^[8]。

现有的反推土壤安全限值的研究主要以食品污染物安全限量标准为起点,通过富集系数或回归方程来探究不同种类农作物的种植土壤基准^[7,9]。我国食品污染物安全限量标准遵循食品法典委员会(CAC)食品中污染物标准制定原则,以风险评估为基础,确定污染物在相关食品中的限量^[10],但是现有标准存在规定体系过于笼统、交叉重复和更新修订滞后等问题^[11]。随着生活水平和健康生活意识的提高,我国人群蔬菜摄入量增加,蔬菜来源重金属暴露的健康风险

也与日俱增^[12]。有必要根据中国人群膳食摄入现状,基于健康风险分析确定蔬菜中重金属的安全限值。

本文以我国主栽蔬菜之一的白菜为例,基于我国居民分年龄段的最新暴露参数,细化分析了蔬菜摄入所致重金属暴露的健康风险,确定蔬菜可食部分和白菜种植土壤重金属中类金属As和重金属Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Hg的安全限值,并与国家标准进行对比分析,为制定不同种类蔬菜种植土壤质量标准提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 基于健康风险评价的重金属安全限量值推定

人体摄入化学物质的健康风险分为致癌风险与非致癌风险。摄入蔬菜所致重金属暴露的致癌风险评价分为两步:首先定性判断该物质是否具有经口致癌毒性,再根据中国人群暴露参数及蔬菜膳食摄入量,评估蔬菜摄入的重金属暴露水平,结合重金属暴露的剂量-效应关系,定量评估蔬菜摄入的个体终生暴露致癌概率;非致癌风险通常以商值法来表示,暴露量与经口摄入参考剂量的商值(HQ值)小于1,表示该暴露水平下不会对人体产生非致癌风险,大于1则表示该暴露水平可能对人体造成非致癌风险^[13]。当致癌风险设定为可接受风险水平,非致癌HQ值设定为1时,可以分别反推蔬菜中重金属的安全限值,取其小者为最终的安全限值。

1.1.1 致癌风险评价

致癌效应的暴露评估,使用一生单位体重平均一日潜在剂量(LADD)。当暴露时间很长,包括了儿童期(C)和成人期(A)时,一般对两个时期的暴露参数分别取值,单位体质量一生平均一日潜在剂量LADD与致癌风险R计算如下:

$$LADD = \frac{\overline{C}_C \times \overline{IR}_C \times ED_C}{BW_C} + \frac{\overline{C}_A \times \overline{IR}_A \times ED_A}{BW_A} \times EF \quad (1)$$

$$R = \frac{SF \times LADD}{X\%} \quad (2)$$

式中:LADD为单位体质量一生平均一日潜在剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; \overline{C} 为蔬菜中重金属的质量分数(本文假设

儿童期与成人期蔬菜中重金属的质量分数相同即 $\overline{C}_C = \overline{C}_A$), $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; \overline{IR} 为蔬菜平均日摄入量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; ED 为暴露时间, a ; EF 为暴露频率, 取为 $350 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; BW 为暴露者体质量, kg ; LT 表示暴露者寿命, d , 本文取中国人平均寿命 $70 \times 365 \text{ d}^{[14]}$; SF 为致癌斜率因子(取值见表1), $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $X\%$ 为经口摄入蔬菜中重金属占总经口摄入量的百分比。

1.1.2 非致癌风险评价

非致癌效应暴露评价, 使用单位体质量平均一日潜在剂量, 将儿童期(C)和成人期(A)分别取值计算, 重金属暴露量 ADD 和商值 HQ 表示如下:

$$ADD = \frac{\overline{C}_C \times \overline{IR}_C \times ED_C + \overline{C}_A \times \overline{IR}_A \times ED_A}{AT} \times EF \quad (3)$$

$$HQ = \frac{ADD}{RfD \times X\%} \quad (4)$$

式中: ADD 为单位体质量一生平均一日潜在剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; AT 为平均化时间, d , 本文考虑从2岁开始摄入蔬菜, 取为寿命值 $LT-2$, $68 \times 365 \text{ d}$; RfD 为经口摄入参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

1.1.3 蔬菜中重金属质量分数安全限值

从儿童期到成人期, 成长过程中不仅体质量变化较大, 蔬菜摄入量亦会随着年龄增长有所变化, 因此, 有必要分为儿童期与成人期, 且对儿童期从开始摄入蔬菜(2岁)至成年(18岁)进行分段计算^[15]。

根据公式(1)、公式(2)可以反推得到致癌风险评价蔬菜中重金属安全限值为:

$$C < \frac{LT}{\left(\sum_{i=1}^8 \frac{ED_{Ci} \times \overline{IR}_{Ci}}{BW_{Ci}} + \frac{\overline{IR}_A \times ED_A}{BW_A} \right) \times EF \times SF} \times R_0 \times X\% \quad (5)$$

式中: ED_{Ci} 为儿童期不同年龄阶段组的暴露时间, a ; IR_{Ci} 为儿童期不同年龄阶段组的蔬菜日摄入量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; R_0 为可接受致癌风险水平, 取WHO给出的最高风险建议值 1×10^{-4} 。

同理根据公式(3)、公式(4)可以反推非致癌风险

评价蔬菜中重金属安全限值为:

$$C \leq \frac{AT}{\left(\sum_{i=1}^8 \frac{ED_{Ci} \times \overline{IR}_{Ci}}{BW_{Ci}} + \frac{\overline{IR}_A \times ED_A}{BW_A} \right) \times EF} \times RfD \times X\% \quad (6)$$

1.2 基于健康风险反推白菜土壤重金属限值方法

搜集有关土壤-白菜系统重金属迁移转运的研究文献(大田采样/盆栽试验), 进行质量判定与筛选, 通过相关分析与回归分析, 探索白菜在正常生长状态下的土壤重金属浓度和可食部重金属浓度的关系, 进而由蔬菜中重金属食用安全浓度限值反推白菜种植土壤的重金属浓度安全限值^[17-31]。需要指出的是, 蔬菜中重金属的来源依据重金属种类的不同而不同^[32], 例如, 蔬菜中的Pb与Hg, 部分来源于植物根系对土壤中Pb与Hg的吸收转运, 部分则来源于蔬菜植株叶片对大气中Pb与Hg的吸收。因此, 反推土壤中重金属的安全限量时, 需要针对不同的情况分别进行计算。本文以白菜为例, 假设白菜中Pb与Hg的50%来源于土壤, 其他重金属100%来源于土壤^[33]。

2 结果与分析

2.1 基于可接受健康风险的蔬菜中重金属浓度安全限值

本文的蔬菜日摄入量(IR)及体质量采用《中国人群暴露参数手册》(0~5岁)、《中国人群暴露参数手册》(6~17岁)及《中国人群暴露参数手册》(成人卷)^[15, 34-35]中针对中国人群的膳食摄入及体重数据(表2)。蔬菜摄入从2岁开始, 若人的平均寿命为70 a, 则总暴露时间为68 a, 将2~17岁分为8个年龄段, 累加计算。蔬菜中各种重金属摄入量占总膳食摄入的比值(表3)则是参考了现有文献值所做的设定。以Cd为例, 张磊等^[36]、刘弘等^[37]、蒋立新等^[38]3篇不同研究区的文献中, 膳食Cd暴露的蔬菜占比分别为27.3%、32.2%和43.0%。综合考虑, 本文Cd暴露的蔬菜占比设定为中值32.2%。没有文献资料参考的Zn和Cr则取为其他几种重金属蔬菜占比设定值的均值

表1 8种重金属经口暴露 RfD 和 SF 的取值^[16]

Table 1 Values of RfD and SF via oral exposure to eight heavy metals^[16]

参数Parameter	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
$RfD/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	3.00×10^{-4}	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}	4.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	3.50×10^{-3}	3.00×10^{-1}	1.00×10^{-4}
$SF/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$	1.50	—	5.00×10^{-1}	—	—	8.50×10^{-3}	—	—

注:表格数据来源于美国环保署USEPA、加州环保署CALEPA和HEAST数据库。https://rais.ornl.gov/tools/profile.php

Note: Data in the table are derived from USEPA, CALEPA and HEAST. https://rais.ornl.gov/tools/profile.php

表2 不同年龄阶段人群体重与蔬菜摄入量

Table 2 Body weight and vegetable intake in different age groups

组号i Groups	年龄 Age	体质量 Body weight/kg	摄入蔬菜 Vegetable intake/g·d ⁻¹
1	2	13.9	124.6
2	3	16	133.4
3	4	18.3	135.5
4	5	20.2	133.1
5	6~9	26.5	151.5
6	10~12	36.8	175.8
7	13~15	47.3	204.9
8	16~18	54.8	197.8
9	18~70	61	335.5

注:摄入蔬菜为鲜质量,本文取白菜含水率为95%。

Note: Vegetables are fresh weight and moisture content is set as 95%.

21.5%。

重金属通过膳食摄入给人体造成致癌与非致癌健康危害,根据我国普通人群暴露特点,将参数代入公式(5)、公式(6),得到基于可接受健康风险水平的我国蔬菜所含重金属安全限量值(表4)。比较致癌风险与非致癌风险结果,取低值者为最终的安全限值。与《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB

2762—2017)^[45]对比,除去As和Cr,其他重金属安全限值均大于国家标准。

2.2 基于可接受健康风险的白菜种植土壤重金属安全限值

基于2.1得出的蔬菜中重金属的安全浓度限值,研究白菜对土壤中重金属的富集能力,反推白菜种植土壤重金属安全限值。以“土壤重金属污染”“蔬菜产地重金属污染”“蔬菜重金属调查”“白菜重金属富集和相关系数”等为关键词,检索知网、万方、web of science、EBSCO、Science Direct等数据库,得到110余篇涉及到大田采样和盆栽试验土壤重金属浓度和对应蔬菜重金属浓度数据的文献。通过文献的整理,剔除不包含白菜数据、调查样点过少不具有代表性、数据标准差过大导致平均值不具有代表性、数据本身存在的异常值、检测手段未采用重金属国家标准检测方法的文献,筛选得到数据可靠文献16篇,白菜重金属浓度与对应土壤浓度共169对。相关分析发现白菜重金属浓度和土壤重金属浓度显著相关,以土壤重金属浓度为自变量,白菜重金属浓度为因变量,得到不同重金属的回归方程(表5)。将蔬菜中8种重金属的安全浓度限量推定值(表4),代入相应重金属的拟合回

表3 中国人群不同类别食物膳食重金属摄入占比

Table 3 Proportion of heavy metals from each food category in total dietary intake for Chinese people

元素 Elements	蔬菜 Vegetable/%	谷物 Cereal/%	水产 Fish/%	肉类 Meat/%	文献来源 Source	本研究 This study/%
Cd	27.3	33.3	—	15.0	张磊等 ^[36]	32.2
	32.2	25.6	23.6	—	刘弘等 ^[37]	
	43.0	27.6	—	2.1	蒋立新等 ^[38]	
Hg	22.9	28.2	9.9	22.1	刘守钦等 ^[39]	22.9
Cu	21.7	61.1	—	—	裴娟等 ^[40]	21.7
As	16.5	67.5	—	4.5	Li等 ^[2]	16.5
Pb	42.6	12.3	—	7.0	蒋立新等 ^[41]	24.5
	175	42.1	—	9.7	洪华荣等 ^[42]	
	24.5	42.3	—	8.2	毛伟峰等 ^[43]	
Zn	—	—	—	—	—	21.5
Cr	—	—	—	—	—	21.5
Ni	12.5	80.2	0.2	3.0	王彩霞等 ^[44]	12.5

表4 蔬菜中8种重金属的安全浓度限量值(mg·kg⁻¹)Table 4 Safety limit values of 8 heavy metals in vegetables(mg·kg⁻¹)

标准 Standards	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
致癌结果 Carcinogenic	0.04	—	0.17	—	—	11.69	—	—
非致癌结果 Non-carcinogenic	0.185	1.20	2.41	32.54	9.37	3.21	241.8	0.085
最终取值 Final value	0.04	1.1	0.17	33	9.4	3.2	242	0.09
GB 2762—2017	0.15	0.05	0.5	—	1	0.1	50	0.01

归方程(表5),得出白菜种植土壤重金属安全限值(表6)。

3 讨论

3.1 蔬菜及土壤重金属安全限量值与现行标准的对比分析

本文所得结果与《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)对比来看,蔬菜重金属安全限量值As、Cr低于国家标准,Cd、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg高于国家标准。差异原因主要有:本文的蔬菜摄入量及体质量等暴露参数取自最新版《中国人群暴露参数手册》(2013年)全国平均数据,并将年龄细化分成不同的年龄组,分别计算后加和,得到基于一般人群可接受健康风险水平的蔬菜中所含重金属的安全限量;计算中考虑了蔬菜摄入重金属暴露量在总膳食重金属摄入中的占比。

从本文所得的白菜种植土壤重金属安全限值与《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)和《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333—2006)^[46]的对比来看,两种致癌物质As和Cr的安全限值较国家标准更低,Pb的安全限值介于

两类标准之间,而Cd、Cu、Ni、Zn、Hg的安全限值比国家标准高(表1)。我国现行农用地标准(GB 15618—2018)遵循风险管控的思路,以保护农产品质量安全为主要目标,兼顾保护农作物生长和土壤生态的需要;温室蔬菜标准(HJ 333—2006)则基于采用生态环境效应法的旧标准《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)制定。本文推定同时考虑了摄食蔬菜所致重金属终生暴露的致癌及非致癌风险,最大限度地保障白菜的食用安全。部分重金属的生态毒理风险远高于健康风险,也是本文部分非致癌重金属的土壤限量浓度偏大的原因之一。另外,本文所推导的白菜种植土壤重金属安全限值基于白菜的重金属富集能力,相比国家标准更具有针对性。

国际上对土壤重金属的标准各有不同。荷兰基于生态风险的土壤临界干预值和基于人体健康风险的临界干预值As为 $76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $576 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd为 $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr(VI)为 $78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;加拿大对农用地中As、Cd、总Cr的质量指导值为12、1.4、 $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,不同国家制定相应标准也有很大不同,标准的制定应符合国情。相对于国际标准,我国对土壤重金属的管控力度属于较严格的范畴,然而,仍然不能忽视重金属致癌性导致的蔬菜食用的健康风险。

我国农田土壤环境质量差异较大。为保障农业生产环境安全,国家制定《农用地土壤环境质量类别划分技术指南(试行)》(2018),对农用地实行分类管理。已有大量研究表明,叶菜类、根菜类、茄果类蔬菜的富集系数差异较大,叶菜类往往比茄果类更加容易富集重金属^[6]。本文基于蔬菜品种的重金属安全限量标准,使在保障蔬菜食用安全的前提下精准利用优先保护类及安全利用类中不同污染程度的农田土壤成为可能。另外,也可以指导轮作蔬菜的选择。在对华北平原蔬菜主产区的调研中发现,存在大量的白菜-辣椒、小青菜-茄子的轮作方式。这种轮作方式

表5 白菜中8种重金属浓度与种植土壤中相应重金属浓度的回归方程

Table 5 Regression equations of concentrations of 8 heavy metals in Chinese cabbage on those of planted soils

重金属 Heavy metal	回归方程 Regression equation	拟合优度 R^2
As	$y=0.0097e^{0.0537x}$	0.919
Cd	$\lg(y)=1.599 \times \lg(x)+0.441$	0.944
Cr	$y=0.1678 \ln(x)-0.2928$	0.7524
Cu	$y=0.0007x^2-0.0578x+1.9866$	0.9779
Ni	$y=0.0727e^{0.0205x}$	0.8215
Pb	$y=0.0016e^{0.2995x}$	0.9097
Zn	$y=2.4584e^{0.0108x}$	0.7120
Hg	$y=0.0003x^2+0.0005x+0.0008$	0.9974

表6 白菜种植土壤的重金属安全限值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 6 Safety limit values of 8 heavy metals in Chinese cabbage planting soils($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

蔬菜 Vegetable	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
白菜 Cabbage	26	3	16	256	236	51	425	33
GB 15618—2018	pH≤5.5	40	0.3	150	50	60	200	1.3
	pH≥7.5	25	0.6	250	100	190	300	3.4
HJ 333—2006	pH≤5.5	30	0.3	150	50	40	200	0.25
	pH≥7.5	20	0.4	250	100	60	300	0.35

可能会在土壤重金属浓度接近安全限值时存在问题,即茄果类蔬菜富集低,蔬菜中重金属浓度低于安全限值;但是叶菜类蔬菜易富集重金属,浓度可能超过安全限值,导致蔬菜食用的安全问题。

3.2 重金属浓度安全限值不确定性的影响因素

本文白菜种植土壤重金属安全限量值的推定基于更为细化的健康风险评估及大量文献调研的汇总分析,使得结果更具科学性。然而,相关变量的取值仍具有一定的不确定性。首先是各种重金属蔬菜摄入占总膳食摄入比值的取值,能够检索到的膳食摄入的相关文献数量偏少,并且不同研究给出的结论也有一定出入。因此,本文在能够检索到的信息中选择具有代表性的中值作为重金属蔬菜摄入占比,并取已有数据的平均值作为无参考文献的重金属摄入的占比。其次,蔬菜摄入量选取的是全国平均摄入量,而全国地区差异较为明显,如西北地区摄食肉类较多而摄入蔬菜较少^[37,39-40,47]。另外,虽然种植区域土壤类型、有机质含量和pH值等因素会影响蔬菜对重金属的富集^[7],目前针对具体蔬菜种植土壤重金属的研究仍然偏少,同时给出土壤理化性质的研究更少,在推定白菜种植土壤重金属安全限值时,未区分土壤pH值等理化性质。再有,蔬菜可以通过叶片吸收大气中的重金属,将Pb、Hg通过该途径对蔬菜中总重金属的贡献率设定为50%,其余重金属为0%,取值具有一定的不确定性,会导致一定偏差。

4 结论

(1)我国人群膳食摄入中由蔬菜摄入贡献的重金属在12%~43%不等,在不同区域膳食摄入差别较大,相同区域不同重金属间差异较大。

(2)基于健康风险分析推定的白菜种植土壤重金属安全限值和目前我国农用地土壤污染风险管控国家标准限值的比较表明,考虑致癌风险所得的As、Cr和Pb的安全限值低于国家标准值;其余5种非致癌重金属的安全限值比国家标准更高。

(3)建议针对具体的蔬菜种类制定相应的种植土壤标准,选择符合标准的地块进行相应品种蔬菜的种植,规范不合理的轮作方式,科学利用不同环境质量的土地,保证蔬菜食用安全。

参考文献:

[1] Satarug S, Baker J, Reilly P, et al. Evidence for a synergistic interaction between cadmium and endotoxin toxicity and for nitric oxide and

- cadmium displacement of metals in the Kidney[J]. *Nitric Oxide*, 2000, 4(4):431-440.
- [2] Li G, Sun G X, Williams P, et al. Inorganic arsenic in Chinese food and its cancer risk[J]. *Environment International*, 2011, 37(7):1219-1225.
- [3] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land (GB 15618—2018)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [4] 宋 静, 骆永明, 夏家淇. 我国农用地土壤环境基准与标准制定研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4):29-35.
- SONG Jing, LUO Yong-ming, XIA Jia-qi. Study of the development of environmental criteria and standards for agricultural lands in China[J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(04):29-35.
- [5] 生态环境部. 生态环境部有关负责人就农用地、建设用土壤污染风险管控标准有关问题答问[R/OL]. 2018. (2018-07-04)[2019-09-09] http://www.gov.cn/zhengce/2018-07/04/content_5303376.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the PRC. The response of the Ministry of Ecology and Environment answered questions on soil pollution risk control standards for agricultural and construction land[R/OL]. 2018. (2018-07-04)[2019-09-09] http://www.gov.cn/zhengce/2018-07/04/content_5303376.htm
- [6] 杜俊杰, 李 娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1193-1201.
- DU Jun-jie, LI Na, WU Yong-ning, et al. Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1193-1201.
- [7] 许根焰, 宋 静, 高 慧, 等. 贵州省白菜种植土壤镉风险管控标准研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1490-1497.
- XU Gen-yan, SONG Jing, GAO Hui, et al. Derivation of risk screening and intervention values for cadmium-contaminated agricultural land base on Chinese cabbage in the Guizhou Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7):1490-1497.
- [8] 黄 标, 胡文友. 设施农业土壤环境质量演变规律、环境风险与管理对策[M]. 北京:科学出版社, 2018:239.
- HUANG Biao, HU Wen-you. Variability of soil environmental quality, environmental risk and management strategies in greenhouse vegetable production system[M]. Beijing: Science Press, 2018:239.
- [9] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝. 基于富集系数对蔬菜地土壤重金属的安全阈值研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2):130-134.
- SHI Ming-yi, WANG Zu-wei, WANG Jia-bao. Study on safety threshold of heavy metals in vegetable soils based on bioaccumulation factor [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(2):130-134.
- [10] 国家食品安全风险评估中心. 食品中污染物限量(GB 2762—2012)问答[R/OL] <https://www.cfsa.net.cn/Article/News.aspx?id=715033A8A4F290DA5C927CEFD02BDA5FC5638B97FF590843A94>

- 7031ACDFA187CB156F86504E520DE
China National Center for Food Safety Risk Assessment. The response of the quantity of pollutants in food[R/OL]. <https://www.cfsa.net.cn/Article/News.aspx?id=715033A8A4F290DA5C927CEF02BDF5FC5638B97FF590843A947031ACDFA187CB156F86504E520DE>
- [11] 沈艳艳. 我国食品标准体系的现状及发展趋势[J]. 农产品加工, 2015(21):55-57.
SHEN yan-yan. Situation and development trend of food standard system[J]. *Farm Products Processing*, 2015(21):55-57.
- [12] Cen X, Wang D, Sun W. The trends of mortality and years of life lost of cancers in urban and rural areas in China, 1990—2017[J]. *Cancer Medicine*, 2020, 9(4):1562-1571.
- [13] 曹红斌. 化学物质健康风险评价的理论与应用[M]. 北京:气象出版社, 2012.
CAO Hong-bin. Theory and application of chemical health risk assessment[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [14] 姜阳. 砷在三七中的累积分布规律及其对药效成分的影响和健康风险评价[D]. 北京:北京师范大学, 2013:50-54.
JIANG Yang. As accumulation in *Panax notoginseng* and its influence on the medicinal constituents and safe usage[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013:50-54.
- [15] 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, 2013:226-229.
Protection Ministry of Environmental. Exposure factors handbook of Chinese population[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013:226-229.
- [16] Jiang Y, Chao S, Liu J, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2016, 168:1658-1668.
- [17] 徐温新, 李艳, 代允超, 等. 影响小白菜铅吸收的土壤因素和预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1584-1591.
XU Wen-xin, LI Yan, DAI Yun-chao, et al. Determination and prediction of lead uptaked by *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1584-1591.
- [18] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜(*Brassica pekinensis* L.)对镉富集基因型差异的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2):226-236.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Genotypic variation of cadmium accumulation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2):226-236.
- [19] 朱书法, 董轶有, 姜勇. 洛阳市郊区蔬菜地土壤-蔬菜中重金属含量的相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2008(3):837-839.
ZHU Shu-fa, DONG Tie-you, JIANG Yong. Correlation of the heavy metal content in soil and vegetable from Luoyang suburban vegetable field[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008(3):837-839.
- [20] 黄朝冉, 江玲, 徐卫红, 等. 菜园土壤和蔬菜中Pb, Cd, Hg和As的质量分数及相关性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11):40-48.
HUANG Chao-ran, JIANG Ling, XU Wei-hong, et al. On contents of Pb, Cd, Hg and As in vegetables and soil and their relations[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(11):40-48.
- [21] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 郑州农区土壤重金属污染与蔬菜质量相关性探析[J]. 中国生态农业学报, 2006(4):126-130.
ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qiang. Correlation between the heavy metal pollution in soil and quality of vegetable in farming district of Zhengzhou[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006(4):126-131.
- [22] 白玉杰, 沈根祥, 陈小华, 等. 三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1619-1625.
BAI Yu-jie, SHEN Gen-xiang, CHEN Xiao-hua, et al. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1619-1625.
- [23] 杨军芳, 贾良良, 冯伟, 等. 施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(增刊1):322-327.
YANG Jun-fang, JIA Liang-liang, FENG Wei, et al. Effect of contents of heavy metals by application of biogas residue in Chinese cabbage and soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(Suppl 1):322-327.
- [24] 王福山, 周斌, 汪开英, 等. 鸡粪施用对青菜、白菜和土壤的重金属累积影响[C]. 重庆:中国农业工程学会2011年年会, 2011.
WANG Fu-shan, ZHOU Bin, WANG Kai-ying, et al. Effects of chicken manure application on heavy metal accumulation in green vegetables, cabbage and soil[C]. Chongqing: Proceedings of the 2011 Annual Conference of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011.
- [25] 丁园, 钟桂芳, 郝双龙, 等. 重金属对工业企业周边红壤-白菜体系的影响[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2010, 24(3):87-91.
DING Yuan, ZHONG Gui-fang, HAO Shuang-long, et al. The effect of heavy metal on red soil-packchoi (*Brassica chinensis*) system around different enterprises[J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2010, 24(3):87-91.
- [26] 陈思宁, 刘新会, 侯娟, 等. 重金属锌胁迫的白菜叶片光谱响应研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(9):1797-1801.
CHEN Si-ning, LIU Xin-hui, HOU Juan, et al. Study on the spectrum response of *Brassica campestris* L. leaf to the zinc pollution[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007(9):1797-1801.
- [27] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 村镇生活垃圾焚烧底渣农用的重金属污染风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):307-313.
ZHANG Gang, WANG De-jian, YU Yuan-chun, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution of agricultural use of municipal solid waste incineration bottom ashes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):307-313.
- [28] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4):714-720.
ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetable[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4):714-720.
- [29] 马瑾, 周永章, 窦磊, 等. 汕头韩江三角洲南部蔬菜重金属污

- 染及因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2008(1):71-77.
- MA Jin, ZHOU Yong-zhang, DOU Lei, et al. Investigation of heavy metals pollution in vegetables and influencing factors in South Hanjiang Delta, Shantou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008(1):71-77.
- [30] 李明德, 汤海涛, 汤睿, 等. 长沙市郊蔬菜土壤和蔬菜重金属污染状况调查及评价[J]. 湖南农业科学, 2005(3):34-36.
- LI Ming-de, TANG Hai-tao, TANG Rui, et al. The investigation and evaluation of heavy metal state form soil and vegetable in the suburb of Changsha region[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2005(3):34-36.
- [31] 金茜, 黎艳明, 张世仙. 锰铁矿周围土壤及蔬菜中汞含量的调查[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(6):544-545.
- JIN Qian, LI Yan-ming, ZHANG Shi-xian. Investigation of mercury content in soil and vegetables around ferromanganese ore[J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(6):544-545.
- [32] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 等. 蔬菜富集重金属Cu、Zn、Pb和Cd的特征和规律研究[C]. 第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 北京:中国土壤学会, 2008:321-326.
- RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, SUN Shi-you, et al. Study on the characteristics and regularity of vegetable enrichment of heavy metals Cu, Zn, Pb and Cd[C]. Proceedings of the 11th National Congress of Chinese Soil Society and the 7th Cross-strait Soil Fertilizer Academic Exchange Seminar(Part ii), Beijing: Chinese Soil Society, 2008: 321-326.
- [33] Cao H B, Chen J J, Zhang J, et al. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 22(11):1792-1799.
- [34] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷0~5岁)[M]. 北京:中国环境出版社, 2016:206-214.
- Protection Ministry of Environmental. Exposure factors handbook of Chinese population(0~5 years)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016:206-214.
- [35] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷6~17岁)[M]. 中国环境出版社, 2016:250-258.
- Protection Ministry of Environmental. Exposure factors handbook of Chinese population(6~17 years)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016:250-258.
- [36] 张磊, 高俊全, 李筱薇. 2000年中国总膳食研究——不同性别年龄组人群膳食摄入量[J]. 卫生研究, 2008(3):338-342.
- ZHANG Lei, GAO Jun-quan, LI Xiao-wei. Chinese total diet study in 2000 cadmium intakes by different age-sex population groups[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2008(3):338-342.
- [37] 刘弘, 吴春峰, 陆屹, 等. 上海市成年人膳食中镉暴露水平评估[J]. 环境与职业医学, 2010, 27(12):711-715.
- LIU Hong, WU Chun-feng, LU Yi, et al. Dietary cadmium exposure assessment in Shanghai adult residents[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2010, 27(12):711-715.
- [38] 蒋立新, 杨梅, 李玥, 等. 深圳居民镉的膳食暴露评估[J]. 中国热带医学, 2016, 16(10):981-985.
- JIANG Li-xin, YANG Mei, LI Yue, et al. Assessment on the level of dietary cadmium exposure of residents in Shenzhen[J]. *China Tropical Medicine*, 2016, 16(10):981-985.
- [39] 刘守钦, 杨柳, 张军, 等. 济南市居民膳食中汞暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(5):676-679.
- LIU Shou-qin, YANG Liu, ZHANG Jun, et al. Dietary mercury exposure assessment among population in Jinan[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2016, 28(5):676-679.
- [40] 裴娟, 曹军, 陶澍. 天津地区人群对铜(Cu)的暴露水平[J]. 农业环境科学学报, 2006(5):1102-1106.
- PEI Juan, CAO Jun, TAO Shu. Human exposures to copper in Tianjin area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(5):1102-1106.
- [41] 蒋立新, 杨梅, 谢思柔, 等. 深圳市居民膳食中铅暴露水平评估[J]. 职业与健康, 2017, 33(11):1496-1499.
- JIANG Li-xin, YANG Mei, XIE Si-rou, et al. Assessment on level of dietary lead exposure of residents in Shenzhen City[J]. *Occupation and Health*, 2017, 33(11):1496-1499.
- [42] 洪华荣, 张向东, 陈剑锋, 等. 厦门市居民膳食中铅、镉暴露水平评估[J]. 卫生研究, 2014, 43(6):1009-1012.
- HONG Hua-rong, ZHANG Xiang-dong, CHEN Jian-feng, et al. Assessment on level of dietary lead exposure of residents in Shenzhen City[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2014, 43(6):1009-1012.
- [43] 毛伟峰, 杨大进, 隋海霞, 等. 我国成人居民膳食中铅暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1):107-110.
- MAO Wei-feng, YANG Da-jin, SUI Hai-xia, et al. Risk assessment of dietary lead exposure in Chinese adult population[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2016, 28(1):107-110.
- [44] 王彩霞, 胡佳薇, 程国霞, 等. 陕西省食品中镍含量调查分析与健康风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(6):993-997.
- WANG Cai-xia, HU Jia-wei, CHENG Guo-xia, et al. Investigation on nickel contamination of food and potential health risk of dietary nickel in Shaanxi Province[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2016, 45(6):993-997.
- [45] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of PRC, State Administration for Market Regulation. National Food Safety Standard Contaminant Limit in Food(GB 2762—2017)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [46] 国家环境保护总局. 温室蔬菜产地环境质量评价标准(HJ 333—2006)[S]. 北京:中国环境出版社, 2006.
- Ministry of Ecology and Environment of the PRC. Environmental quality evaluation standard for farmland of greenhouse vegetables production(HJ 333—2006)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [47] 张维蔚, 侯建荣, 余超, 等. 广州市居民膳食镉含量监测及暴露评估[J]. 职业与健康, 2017, 33(4):477-480.
- ZHANG Wei-yu, HOU Jian-rong, YU Chao, et al. Surveillance and dietary exposure assessment on cadmium in Guangzhou residents[J]. *Occupation and Health*, 2017, 33(4):477-480.