

陈晨, 郭雪雁, 王萌, 等. 基于体外模拟法评价蔬菜中Cd的健康风险与污染土壤修复效果[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 144–150.
CHEN Chen, GUO Xue-yan, WANG Meng, et al. Human health risk assessment of Cd in vegetables and the remediation effect of Cd-polluted soil evaluated using an in-vitro simulation test[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 144–150.

基于体外模拟法评价蔬菜中Cd的健康风险与污染土壤修复效果

陈晨¹, 郭雪雁¹, 王萌², 贾兴永^{3*}, 陈世宝²

(1. 北京交通大学附属中学, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要:为探明北方地区常见蔬菜中Cd的健康风险,以北京地区Cd污染的大棚菜地土壤为对象,利用盆栽实验测定了韭菜和小油菜对Cd的吸收、转运特征及2种修复剂(沸石+蚯蚓粪,凹凸棒+蚯蚓粪)对Cd污染土壤的修复效果,基于体外模拟法和人体健康风险评价方法对污染土壤修复前、后的2种蔬菜中Cd的有效性及人体健康风险进行评价。结果表明,污染土壤上的2种蔬菜中Cd含量均超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》,但2种蔬菜对Cd的吸收具有显著差异,小油菜中Cd的含量为韭菜的2.04倍;体外模拟法测定结果表明,韭菜和小油菜中Cd在模拟人体胃液中的有效浓度分别为0.027、0.039 mg·kg⁻¹,韭菜中的Cd对人体具有更高的生物有效性;基于人体健康风险评价方法对2种蔬菜中Cd进行健康风险评价,结果表明,污染土壤上种植的2种蔬菜中Cd对人体具有较高的致癌风险,其中,对0~6岁儿童的致癌风险大于成人(>18岁)的风险;添加修复剂可使韭菜和小油菜中Cd含量最大分别降低65.2%和72.3%;2种修复剂处理的韭菜与小油菜中Cd的生物有效性和致癌风险值显著下降,其中凹凸棒+蚯蚓粪处理土壤的2种蔬菜中Cd的致癌风险值接近安全水平。

关键词:镉;污染土壤;蔬菜;健康风险;修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)01-0144-07

doi: 10.13254/j.jare.2018.0256

Human health risk assessment of Cd in vegetables and the remediation effect of Cd-polluted soil evaluated using an in-vitro simulation test

CHEN Chen¹, GUO Xue-yan¹, WANG Meng², JIA Xing-yong^{3*}, CHEN Shi-bao²

(1. The High School Attached to Beijing Jiaotong University, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Cd-polluted field soil was collected from a greenhouse in Beijing and a pot experiment was conducted to investigate the uptake and accumulation of Cd by leek and rape. The bioavailability of Cd in human gastric juice and human health risk of Cd in vegetables grown on Cd-polluted soil and soil remediated with amendments (zeolite+earthworm manure, attapulgite+earthworm manure) were determined using an in-vitro simulation test and by health risk assessment, respectively. The results indicated that the Cd content in the both vegetables exceeded the *National Food Safety Standard* and that there was a significant difference in the uptake content of Cd between the vegetables. The Cd content in rape was 1.04 times higher than that in leek. According to the in-vitro simulation test, the bioavailable Cd content in leek and rape reached 0.027, 0.039 mg·kg⁻¹ fresh weight, indicating that Cd in leek is more available for human than that in rape. The carcinogenic risk of Cd to human body was observed for the both vegetables based on the health risk assessment. Moreover, the carcinogenic

收稿日期:2018-09-28 录用日期:2019-02-17

作者简介:陈晨(2001—),男,北京人,在读高中生。E-mail: chchen0906@126.com

*通信作者:贾兴永 E-mail: jiaxingyong@caas.cn

基金项目:北京青少年科技后备人才专项;国家自然科学基金项目(41877387)

Project supported: Beijing Youth Science and Technology Reserve Talents Project; The National Natural Science Foundation of China (41877387)

risk to children aged 0~6 years was higher than that to adults aged >18 years. The maximum decrease in the Cd content in leek and rape grown on soil treated with amendments was 65.2% and 72.3%, respectively, compared with that in the corresponding controls. Further, the bioavailability and carcinogenic risk of Cd in leek and rape decreased significantly with different soil amendment treatments, and the carcinogenic risk value of Cd approached the safety level in the both vegetables grown on soil treated with a mixture of attapulgite and earthworm manure.

Keywords: Cd; polluted soil; vegetable; health risk; remediation

蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物,也是十分重要的经济作物。随着工业快速发展和农业高度集约化发展,我国大多数城市近郊土壤都受到不同程度的重金属污染,蔬菜中重金属含量超标逐渐引起人们关注^[1-4]。闻剑等^[5]对广东21个地市的615份蔬菜样品检测结果表明,蔬菜中Pb、Cd超标率分别达到5.2%和6.2%;长沙市各主要蔬菜基地生产的13种蔬菜中Pb和Cd污染严重,超标率分别为60%和51%^[6];重庆市蔬菜Cd超标率达到36.7%^[7];保定市污灌区土壤中蔬菜Cd的检出超标率为89.3%^[8];韶关市区蔬菜中Pb的超标率高达50.2%,Cd的超标率甚至高达87.6%^[9]。对国内蔬菜重金属污染的调查结果表明,我国菜地土壤重金属污染形势非常严峻^[10-12]。蔬菜对土壤中Cd有一定的富集能力,积累的Cd可通过食物链进入人体给人类健康带来危害。对北京市菜地土壤和蔬菜Cd含量总体状况以及蔬菜镉研究结果表明,北京市居民每人从蔬菜中摄入Cd的量为 $12.2 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,存在一定的潜在健康风险^[2]。目前,我国针对农产品重金属污染风险的评价主要基于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[13]中不同农产品重金属的限量值,而重金属经过不同作物吸收、转运后,重金属在作物不同组织、细胞中的结合形态不同,从而使其对人体的有效性有较大差异,进而导致重金属的健康风险也具有很大差异^[14-16],因此,基于农产品中重金属的有效性进行健康风险与污染土壤修复效果的评价具有重要意义。

目前,虽然国内外对污染土壤修复进行了大量的研究,但可应用于污染农田修复的成熟技术并不多^[17-18]。针对我国农田土壤污染的国情与农情,基于

无害化与减量化相结合原则,原位化学钝化修复是目前我国农田污染土壤主要修复技术之一^[19-20]。在原位化学钝化修复研究中^[19-21],常用的农田土壤重金属钝化剂包括有机材料和无机材料两大类。有机材料主要包括农业废弃物、畜禽粪便及生物质炭等;无机材料包括零价铁、石灰、含磷物质、碳酸钙、沸石、硅酸盐等。而污染土壤修复技术仍然存在修复材料性价比低、修复效果不稳定及土壤中污染物的废物增容等瓶颈问题。综上,本研究以北京市某种植大棚蔬菜的Cd超标土壤为对象,通过种植2种北方地区最常食用的蔬菜(小油菜与韭菜),基于人体体外模拟和致癌风险评价方法对蔬菜中Cd的有效性及其健康风险进行评价,同时对自制的2种土壤修复剂(沸石、凹凸棒粉与蚯蚓粪混合而成)对Cd污染土壤的修复效果进行评价,以期对农产品中Cd的健康风险评价与污染土壤修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与蔬菜

采集了北京地区某长期种植蔬菜的大棚表层(0~20 cm)土壤,采样点坐标为 $116^{\circ}28.2'79.3''\text{E}$ 、 $39^{\circ}96.6'08.5''\text{N}$ 。将采集的土壤自然风干后,剔除石块与植物根系,过2 mm尼龙筛后备用。参照文献^[22]进行土壤理化性质的测定,蔬菜中Cd含量的测定参考文献^[23]。土壤基本理化性质见表1。经测定,受试土壤属于Cd污染土壤。

供试蔬菜品种为韭菜(*Allium tuberosum* Rottler L.)和小油菜(*Brassica campestris* L.),购自中国农业科学院蔬菜种子公司。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	pH(H ₂ O)	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	<0.002 mm 黏粒 Clay/%	Cd含量 Cd content/mg·kg ⁻¹	
					总量 Total	有效态 DTPA-Cd
褐土 Brown earth	7.86	42.5±4.3	29.4±4.7	30.4±6.0	0.97±0.18	0.43±0.27

注:测定值为平均值±标准误差(n=3)。

Note: Data in the table are mean±SE(n=3).

1.2 修复剂制备与测定

土壤修复剂原材料分别为过300目筛的沸石与凹凸棒粉以及过60目筛的蚯蚓粪便。其中沸石为钾钙铝硅酸盐黏土矿物 $[(K_2, Ca)_2Al_4Si_{14}O_{36} \cdot 15H_2O]$,凹凸棒粉为富镁铝硅酸盐黏土矿物 $[Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2(OH_2)_4 \cdot 4H_2O]$ 。将蚯蚓粪便分别与沸石和凹凸棒按照质量比=1:3进行混合制成2种修复剂, pH值分别为7.8和8.0。

1.3 盆栽实验

称取过2 mm筛的土壤1.50 kg装盆, 每种蔬菜共设3个处理: CK对照、T1(每盆添加沸石+蚯蚓粪便修复剂30 g)和T2(每盆添加沸石+凹凸棒修复剂30 g), 共6个处理, 每个处理6次重复。添加不同修复剂后, 每个处理加水400 mL后充分拌匀, 置于中国农业科学院大棚控温温室分别进行韭菜与小油菜培养, 大棚采用自然光照, 昼夜温度分别保持在 $(25 \pm 2)^\circ C$ 、 $(20 \pm 2)^\circ C$ 。韭菜于2016年4月25日育苗, 小油菜于2016年6月12日育苗。韭菜和小油菜均于2016年6月16日进行盆栽(其中韭菜采用4~5 cm高的幼苗移栽、小油菜为发芽后直接播种), 生长30 d后, 于2016年7月16日收获。实验结束时, 收获地上1 cm处的茎叶, 按《食品中镉的测定方法》(GB/T 5009.15—2014)进行茎叶中Cd含量测定^[23]: 称量新鲜蔬菜样品2.0 g, 用匀浆机打碎, 加入10 mL硝酸-高氯酸混合溶液后, 利用红外加热法消解, Cd含量采用石墨炉原子吸收分光光度计(AA-7000)测定, 以国家标准物质GBW10015(GSB-6菠菜)进行精度检测, 回收率为95.7%~103.2%。

1.4 测定方法

1.4.1 Cd的生物有效性的测定

蔬菜与土壤中Cd的生物有效性采用体外模拟测试方法^[15]测定: 在智能药物溶出仪的反应器中按固液比1:100加入新鲜的韭菜与小油菜样品(吸干水分)4.0 g, 然后在反应器中加入预配模拟胃液(表2), 每个溶出杯内含400 mL模拟胃液, 在反应液中通入 $1 L \cdot min^{-1}$ 氩气, 以创造厌氧环境, $37^\circ C$ 下以 $100 r \cdot min^{-1}$ 搅动1 h后用取样针吸取20 mL反应液, 过 $0.45 \mu m$ 的滤膜, 得到提取液, 进行Cd含量测定。土壤中Cd生物有效性测定方法同上。由于Cd的生物可给性是其最大经口途径生物有效性的指示, 本研究以Cd的生物可给性代表其生物有效性。

蔬菜或土壤Cd在胃液中的生物可给性计算方法^[15]:

表2 模拟人体胃液的化学组成

Table 2 Simulated chemical composition of human gastric juice

试剂名称 Reagents	含量 Concentration	模拟胃液制备 Simulated gastric juice
NaCl	$0.15 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$	用 $12 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ HCl将pH值调到1.5, 用超纯水定容至500 mL, $4^\circ C$ 保存。
柠檬酸 Citric acid	2.0 g	
苹果酸 Malic acid	2.0 g	
乳酸 Lactic acid	1.68 mL	
醋酸 Acetic acid	2.0 mL	
胃蛋白酶 Pepsase	5.0 g	

$$BA = (C_{IV} V_{IV}) / (C_S M_S) \times 100\% \quad (1)$$

式中: BA为Cd的生物可给性; C_{IV} 为体外模拟实验的胃液中Cd的可溶态含量, $mg \cdot L^{-1}$; V_{IV} 为各反应器中反应液的体积, L; C_S 为蔬菜或土壤样品中Cd的含量, $mg \cdot kg^{-1}$; M_S 为反应器中的蔬菜或土壤样品的质量, kg。

蔬菜Cd摄入量, 即日平均通过蔬菜途径摄入的Cd量的计算:

$$W_m = C_m \times W_{veg} \quad (2)$$

式中: W_m 为Cd的摄入量, $\mu g \cdot d^{-1}$; C_m 为蔬菜中Cd含量, $\mu g \cdot g^{-1}$; W_{veg} 为日均蔬菜摄入量, 儿童(0~6岁)为0.233 kg, 成人(>18岁)为0.355 kg^[16]。

蔬菜Cd生物可给量, 即每日摄入体内的Cd可被吸收的量的计算:

$$W_A = W_m \times BA \quad (3)$$

式中: W_A 为日可吸收的Cd的量, $\mu g \cdot d^{-1}$ 。

1.4.2 Cd致癌风险评价方法

根据USEPA(美国环保局)提出的化学物质致癌性的程度, 将金属元素分为化学致癌性金属元素(As、Cd、Cr)和化学非致癌性金属元素(Al、Cu、Fe、Hg、Mn、Co、Ni、Pb、Zn)两大类^[24]。本研究中的重金属Cd具有较强的致癌性, 因此, 采用致癌风险评价方法来计算儿童和成人经蔬菜-人体系统摄入Cd而产生的致癌风险:

重金属(Cd)的潜在致癌风险评价方法^[24]:

$$CR = EDI \times BA \times SFO \quad (4)$$

式中: CR为致癌风险值, 用来评价致癌风险的可能性; EDI为每日可吸收的Cd的测算值, 测算方法见公式(1)~(3); SFO为评估参数^[24], 儿童(0~6岁)取值为 $1.0 d \cdot mg^{-1}$, 成人(>18岁)取值为 $0.6 d \cdot mg^{-1}$ 。CR>0.001表示有潜在致癌风险^[25-26]。

1.5 统计分析

采用Excel 2007和SAS 9.2软件对所有试验数据

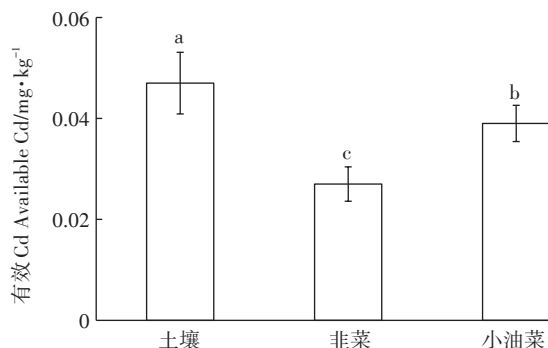
进行处理间的差异显著性($\alpha=0.05$)分析。

2 结果与讨论

2.1 不同蔬菜中Cd的含量及生物有效性

对土壤修复前韭菜与小油菜中Cd的含量测定结果表明,韭菜与小油菜中Cd的含量分别为 $0.368 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{FW})$ 和 $0.752 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{FW})$,小油菜(十字花科)中Cd的含量为韭菜(百合科)中Cd含量的2.04倍,这可能与不同作物对污染物Cd的富集系数差异有关。与我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[13]中Cd限量标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,韭菜与小油菜中Cd分别超过限量标准值84.0%和276.0%。

基于体外模拟法分别对小油菜、韭菜及土壤中Cd的生物有效性测定结果(图1)表明,土壤、韭菜和小油菜中Cd在模拟人体胃液中的有效浓度分别为 $0.041\sim 0.052$ 、 $0.023\sim 0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.035\sim 0.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是土壤、韭菜和小油菜中总Cd浓度的4.86%、7.42%和5.51%。与蔬菜中Cd的有效性相比,土壤中Cd在胃液中的有效性相对较低($<5.0\%$),这可能与土壤中Cd的结合形态有关。Cd的有效性取决于Cd的化学结合形态,进入土壤中的Cd通过吸附、络合及沉淀等平衡反应后,形成不同化学结合形态的Cd,包括可溶态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态及残渣态,不同结合形态的Cd对生物体的有效性具有很大差异^[27]。与小油菜相比,尽管韭菜中Cd的浓度低于小油菜,但韭菜中的Cd更容易被人体吸收(其胃液中Cd有效浓度占总Cd的比例比小油菜高1.91个百分点)。



图中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters indicate significant difference($P<0.05$). The same below

图1 土壤和蔬菜中Cd在模拟胃液中的有效浓度

Figure 1 Available Cd in simulated gastric juice for soil and vegetables samples

2.2 蔬菜中Cd的健康风险评价

根据2种蔬菜中Cd在胃液中的有效含量与日平均蔬菜摄入量,计算出儿童(0~6岁)与成人(>18 岁)的Cd日摄入量,在此基础上计算的2种蔬菜潜在致癌风险值(CR)见表3。结果表明,成人每日通过韭菜和小油菜摄入的Cd量分别为 $130.6 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $267.0 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,均高于儿童的日摄入量($85.8 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $175.2 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$),在此基础上计算得出的2种蔬菜中Cd对儿童与成人的致癌风险评估值。表3可以看出,摄入韭菜与小油菜对儿童的致癌风险值分别为0.020 1和0.026 6,2种蔬菜对成人的致癌风险值分别为0.018 3和0.024 3,CR值均超出可接受范围($\text{CR}>0.001$)。说明长期食用本实验中Cd超标的韭菜与小油菜具有潜在的致癌风险,而2种蔬菜中Cd对儿童的危害风险均显著高于成人($P<0.05$)。2种不同蔬菜中,虽然韭菜中Cd在胃液中的有效性高于小油菜,但其Cd浓度显著低于小油菜,综合以上因素,摄入小油菜的健康风险更高。

2.3 修复剂对Cd污染土壤的修复效果

向污染土壤添加2种修复剂进行盆栽实验,28 d后的结果表明,与CK相比,添加沸石+蚯蚓粪便(T1)与添加凹凸棒+蚯蚓粪便(T2)土壤中,韭菜中Cd的含量(基于鲜质量)分别降低了38.0%和65.2%,而小油菜中Cd的含量分别降低了58.5%和72.3%(图2),T2处理对降低蔬菜中Cd的含量更有效。在2种修复剂处理中,T2处理的韭菜中Cd含量为 $0.128 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于我国食品中Cd限量标准值;小油菜中Cd含量为 $0.208 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,接近食品中Cd限量标准值。

不同修复剂处理前后土壤及蔬菜中Cd在模拟人

表3 蔬菜中Cd的健康风险评价

Table 3 Health risk assessment of Cd in different vegetables

蔬菜 Vegetables	Cd日摄入量		致癌风险值	
	Daily Cd intake/ $\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$		Carcinogenic risk (CR)	
	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults
韭菜 <i>Chinese chive</i>	85.8 ± 6.7	130.6 ± 11.3	0.020 1a	0.018 3b
小油菜 <i>Brassica campestris</i>	175.2 ± 12.9	267.0 ± 21.5	0.026 6a	0.024 3b

注:表中数据为平均值±标准差($n=6$);CR值大于0.001表示有潜在致癌风险,下同;相同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in the table are mean \pm SD ($n=6$); $\text{CR}>0.001$ indicates potential carcinogenic risk, the same below; Different letters in the same line mean significant difference($P<0.05$).

体胃液中的有效性变化测定结果(图3)表明,经过不同修复剂处理后,韭菜与小油菜中Cd在模拟人体胃液中有有效浓度及占全Cd的比例有不同程度下降,与对照相比,T1处理韭菜与小油菜中Cd的生物有效性分别下降了1.92、0.78个百分点,T2处理韭菜与小油菜中Cd的生物有效性分别下降了2.20、1.00个百分点。说明经过修复剂处理后,不同蔬菜中吸收、转运Cd的化学形态有较大变化,由人体较容易吸收的形态转变为难以被吸收的化学形态。植物根系从土壤中吸收、转运的Cd包括自由Cd²⁺、低分子有机结合态Cd、无机络合态Cd等多种形态,植物通过共质体、中柱吸收转运不同形态Cd后,根据各自的应激策略将其区隔在细胞的不同部位^[28]。不同结合形态Cd²⁺进入植物体细胞后,以不同的化学结合形态存在。在不同结合形态中,与无机盐、有机盐结合形态Cd的生物有效性较高,而磷酸盐、草酸盐等结合态Cd的生物有效性较低^[29]。不同作物体内Cd的结合形态有很大差异^[30-31],如蕹菜、菜心、水稻植株内的Cd大部分被固定在细胞壁,辣椒细胞壁只能结合一小部分Cd(8%~

17%),Cd的可溶性比例很高,而美洲商陆和芥蓝菜中的Cd大部分储存在液泡中。Cd在植物中的亚细胞分布及结合形态是造成其在不同植物中Cd生物有效性差异的一个重要因素。本研究中,小油菜细胞质中的Cd可能以磷酸盐、草酸盐等结合形态为主,占比高于韭菜中Cd相应结合形态,故难溶部分的Cd比例较高。

利用致癌风险评价方法,对不同修复剂处理后蔬菜中Cd的健康风险进行评价,结果(表4)表明,韭菜与小油菜中Cd的含量与胃液中Cd的生物有效性显著降低。与对照相比,T1和T2处理2种蔬菜的致癌风险值均大幅下降,其中T2处理土壤的韭菜中Cd的致癌风险值接近安全水平(0.001),虽然T1处理蔬菜中的Cd致癌风险值有显著下降,但仍然具有一定的潜在健康风险。

3 结论

(1)小油菜中Cd的含量为韭菜中Cd含量的2.04倍;体外模拟胃液法测定结果表明,韭菜中的Cd对人

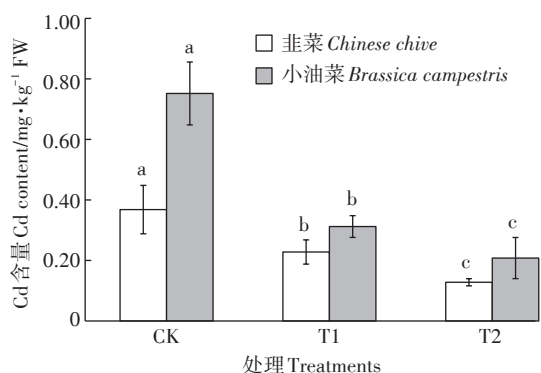


图2 不同修复处理对蔬菜中Cd含量的影响

Figure 2 Effect of soil amendments on Cd content in vegetables

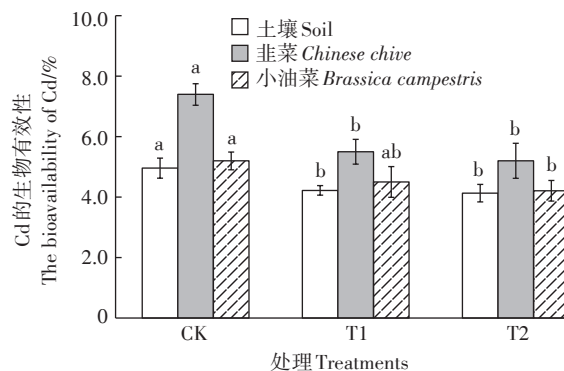


图3 修复前后土壤与蔬菜中Cd在模拟胃液中的有效性变化

Figure 3 The bioavailability of Cd in simulated gastric juice for soil and vegetables samples before and after soil remediation

表4 不同处理对蔬菜中Cd的有效性及其致癌风险值的影响

Table 4 Effect of soil amendments on bioavailability of Cd in simulated gastric juice and carcinogenic risk values of Cd in vegetables

处理 Treatments	蔬菜 Vegetables	Cd日摄入量 Daily Cd intake/ $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$		Cd生物有效性 The bioavailability of Cd/%	致癌风险值 Carcinogenic risk (CR)	
		儿童 Children	成人 Adults		儿童 Children	成人 Adults
CK	韭菜 Chinese chive	85.7b	130.6b	7.42	0.006 3b	0.005 8b
	小油菜 Brassica campestris	175.2a	267.0a	5.21	0.009 1a	0.008 3a
T1	韭菜 Chinese chive	53.1d	80.9d	5.50	0.002 9c	0.002 7c
	小油菜 Brassica campestris	72.7c	110.8c	4.43	0.003 3c	0.003 0c
T2	韭菜 Chinese chive	29.8e	45.4e	5.22	0.001 6d	0.001 4d
	小油菜 Brassica campestris	48.5d	73.8d	4.21	0.002 0d	0.001 8d

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column mean significant differences among treatments ($P<0.05$).

体具有更高的生物有效性。

(2)致癌风险评价结果表明,韭菜与小油菜中的Cd对人体具有潜在的致癌风险,其中,对0~6岁儿童的致癌风险大于成人(>18岁)。

(3)添加修复剂可使韭菜和小油菜中Cd含量下降,最大降幅分别为65.2%和72.3%;不同修复剂处理的韭菜与小油菜中Cd的生物有效性和致癌风险值均显著下降,其中凹凸棒+蚯蚓粪处理土壤的蔬菜中Cd的致癌风险值接近安全水平。

参考文献:

[1] 张帆,谢玲玲,弥宝彬,等. 蔬菜对重金属镉富集研究进展[J]. 湖南农业科学, 2017(7):127-130.
ZHANG Fan, XIE Ling-ling, MI Bao-bin, et al. Research progress on heavy metal cadmium enrichment in vegetables[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(7):127-130.

[2] 宋波,陈同斌,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8):1343-353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8):1343-1353.

[3] 王晓波,陈海珍,刘冬英,等. 广州市蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(5):549-551.
WANG Xiao-bo, CHEN Hai-zhen, LIU Dong-ying, et al. Contents of heavy metal in vegetables and their potential risks to human health in Guangzhou City[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2011, 27(5):549-551.

[4] 张晓云,李蕴成. 蔬菜重金属污染现状与防治措施[J]. 微量元素与健康研究, 2008, 25(2):49-50.
ZHANG Xiao-yun, LI Yun-cheng. Current heavy metal pollution in vegetables and its prevention strategy[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2008, 25(2):49-50.

[5] 闻剑,梁辉,胡曙光,等. 2013—2014年广东省基地蔬菜重金属污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2):159-164.
WEN Jian, LIANG Hui, HU Shu-guang, et al. Investigation of heavy metal contamination of vegetables from vegetable base of Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2015, 27(2):159-164.

[6] 沈彤,刘明月,贾来,等. 长沙地区蔬菜重金属污染初探[J]. 湖南农业大学学报, 2005, 31(1):87-90.
SHEN Tong, LIU Ming-yue, JIA Lai, et al. Investigate on the heavy metal pollution of vegetables in Changsha region[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2005, 31(1):87-90.

[7] 唐书源,李传义,张鹏程,等. 重庆蔬菜的重金属污染调查[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(6):74-75.
TANG Shu-yuan, LI Chuan-yi, ZHANG Peng-cheng, et al. Investigation on heavy metal pollution to vegetables in Chongqing[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(6):74-75.

[8] 谢建治,刘树庆,王立敏,等. 保定市郊土壤重金属污染现状调查

及其评价[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(1):38-41.
XIE Jian-zhi, LIU Shu-qing, WANG Li-min, et al. The survey and evaluation of heavy metal pollution in suburban soil of Baoding City[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2002, 25(1):38-41.

[9] 唐意佳,赵磷石. 韶关市区蔬菜中铅镉检测结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2004, 14(5):603-604.
TANG Yi-jia, ZHAO Lin-shi. The results and its analysis of Pb, Cd in vegetables for Shaoguan City[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2004, 14(5):603-604.

[10] Chen H, Tang Z, Wang P, et al. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238:482-490.

[11] 王云丽,石耀鹏,赵文浩,等. 设施菜地土壤镉钝化剂筛选及应用效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7):1503-1510.
WANG Yun-li, SHI Yao-peng, ZHAO Wen-hao, et al. Screening of amendments for the remediation of Cd-polluted protected agriculture soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1503-1510.

[12] 何江华,杜应琼,周晓洪,等. 镉对叶菜生长和产量的影响及其在叶菜体内的积累[J]. 农业环境科学学报, 2006(3):597-601.
HE Jiang-hua, DU Ying-qiong, ZHOU Xiao-hong, et al. Effects of cadmium on the growths and yields of leaf vegetables and accumulation of cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(3):597-601.

[13] 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, China Food and Drug Administration. National standard for food safety: Pollutant limits in foods GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[14] 崔玉静,张旭红,朱永官. 体外模拟法在土壤-人途径重金属污染的健康风险评价中的应用[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(9):672-675.
CUI Yu-jing, ZHANG Xu-hong, ZHU Yong-guan, et al. Health risk assessment of soil-oral exposure of heavy metal contaminated soil by in vitro method[J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, 24(9):672-675.

[15] 陈海珍,龚春生,陈丽秋,等. 基于体外模拟法的城市土壤铅的健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(3):254-257.
CHEN Hai-zheng, GONG Chun-sheng, CHEN Li-qiu, et al. Health risk assessment of lead in urban soil by simulation methods in vitro[J]. *Environment and Health*, 2012, 29(3):254-257.

[16] China Ministry Health. China's health statistical yearbook[M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2006.

[17] 骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. 环境监测管理与技术, 2011(3):1-6.
LUO Yong-ming. Contaminated site remediation in China: Progresses, problems and prospects[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011(3):1-6.

[18] 周东美,郝秀珍,薛艳,等. 污染土壤的修复技术研究进展[J].

- 生态环境, 2004, 13(2):234-242.
- ZHOU Dong-mei, HAO Xiu-zhen, XUE Yan, et al. Advances in remediation technologies of contaminated soils[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):234-242.
- [19] 郑 涵, 安 平, 段淑辉, 等. 基于籽粒Cd消减率与边际效率评价Cd污染稻田的修复效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):217-223.
- ZHENG Han, AN Ping, DUAN Shu-hui, et al. Remediation effect of Cd polluted paddy soil evaluated by grain Cd reduction rate and marginal efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1):217-223.
- [20] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4):477-483.
- ZHUANG Guo-tai. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4):477-483.
- [21] 瞿 飞, 范成五, 刘桂华, 等. 钝化剂修复重金属污染土壤研究进展[J]. 山西农业科学, 2017, 45(9):1561-1565.
- ZHAI Fei, FAN Cheng-wu, LIU Gui-hua, et al. Research progress on remediation of heavy metal contaminated soils with different passivation agents[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(9):1561-1565.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准: 食品中镉的测定 GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of PRC. National Standard for food safety: Method for determination of cadmium in foods GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [24] US Environmental Protection Agency (USEPA). Integrated risk information system (IRIS)[DB/OL]. [2018-09-28]. <http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- [25] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure parameter manual for Chinese population[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [26] Chary N S, Kamala C T, Raj D S S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(3):513-524.
- [27] 刘 彬, 孙 聪, 陈世宝, 等. 水稻土中外源Cd老化的动力学特征与老化因子[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7):2137-2145.
- LIU Bin, SUN Cong, CHEN Shi-bao, et al. Dynamic characteristics and ageing factors of Cd added to paddy soils with various properties[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(7):2137-2145.
- [28] 于 辉, 向言词. 镉不同积累型作物品种对镉吸收、转运和积累特性的研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37(2):223-228.
- YU Hui, XIANG Yan-ci. Advance in study of cadmium uptake, translocation and accumulation in different crop varieties[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(2):223-228.
- [29] Liu B, Chen S B. Subcellular Cd accumulation characteristic in root cell wall of rice cultivars with different sensitivities to Cd stress in soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(9):2114-2122.
- [30] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186:103-107.
- [31] Yu H, Xiang Z X, Zhu Y, et al. Subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different levels of Cd accumulation[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35:71-84.