

## 花生中重金属含量的影响因素及其来源

王磊, 唐娟, 于春娣, 丁秋娟, 赵皓卿, 杨庆利, 赵海燕\*  
(青岛农业大学食品科学与工程学院 山东青岛 266109)

**摘要** 为分析花生中重金属含量的影响因素及其来源,进行产地及品种田间模型试验,采集花生、土壤及降水样品,测定样品中 7 种重金属的含量。结合单因素方差分析、多因素方差分析和 Pearson 相关性分析,解析产地、品种及其交互作用对花生中重金属含量的影响,探究重金属含量与种源土壤和降水中重金属含量的关系。结果显示,花生中 Ni、Cd 和 Tl 含量的变化主要受地域的影响;As 含量的变化主要受地域×品种交互作用的影响;Cr、Sb 和 Pb 含量的变化受其它因素影响较大。花生中 As、Sb 和 Pb 的含量与土壤和降水中相关元素的含量没有显著相关性;Cd 和 Ni 含量与土壤和降水均呈现显著相关;Cr 和 Tl 含量与土壤中相关元素含量显著相关。研究表明花生中重金属含量受产地和品种的影响,重金属的来源不仅有土壤和降水,可能还有农药和肥料等其它来源。

**关键词** 花生; 重金属; 产地; 品种; 土壤; 降水

**文章编号** 1009-7848(2022)01-0349-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.038

花生籽粒是重要的油料种子之一,在世界范围内广泛种植。花生还是重要的经济作物,中国是世界主要的花生生产国和出口国之一,2019 年中国花生产量占全球产量的 38.5%<sup>[1]</sup>。花生籽粒含有丰富的油脂,在保障食用油脂安全方面发挥重要作用,可提供蛋白质、脂肪、维生素和饱和脂肪酸等物质补充人类饮食<sup>[2-5]</sup>。

由于传统的农业生产过于追求产量和效益,花生产区土壤和花生容易遭受重金属污染,致花生品质下降,花生中重金属含量超标情况时有发生<sup>[6]</sup>。花生是地下结果作物,除了根系具有吸收重金属能力外,荚果也能吸收重金属,导致花生对重金属的富集更为明显,对作物生长发育和人类健康具有重要影响<sup>[7-8]</sup>。花生安全生产越来越受到人们的关注。

我国农田最常见的重金属污染为镉、铬、铅、砷、汞和铜,其中镉污染较为严重<sup>[9]</sup>。有研究表明,一些地区土壤重金属含量达到中等污染水平以上<sup>[10-11]</sup>。一般来说,花生重金属污染现象与土壤重金属密切相关<sup>[12]</sup>。目前,国内关于花生中重金属污

染情况的研究主要集中在不同花生品种对重金属的吸收差异,以及重金属胁迫下对花生生理特性、产量和品质的影响<sup>[13-17]</sup>。国外报道,有利用真菌共生和植物螯合素减少花生籽粒中重金属镉积累的研究<sup>[18-19]</sup>;有研究长期施肥对花生产量和土壤重金属积累的影响<sup>[20]</sup>;还有研究表明花生籽粒中重金属的生物有效性较高,对重金属的吸收和积累能力较强<sup>[21]</sup>。目前,国内外综合分析产地和品种对花生中重金属含量的影响鲜有报道。另外,花生中重金属含量与产地土壤和降水间的关系尚不清楚。

花生中重金属含量可能受生长环境的影响,不同产地的土壤和降水中重金属含量不同,可能会导致花生中重金属含量不同。另外,不同品种的花生由于代谢的差异,重金属含量也可能不同<sup>[22-23]</sup>。本文分析产地、品种及其交互作用对花生中重金属含量的影响,及花生中重金属与土壤和降水之间的关系,为花生中重金属含量研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

2019 年 4 月,分别在山东省即墨市、沂水县和莱州市各选 1 个试验点,每个试验点种植海花 1 号、鲁花 11 号和大白沙 3 个品种的花生,各品种随机排列,每个品种种植面积约 10 m<sup>2</sup>。9 月从各试验点采集花生、土壤和降水样品。

收稿日期: 2021-01-04

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019BC033);山东省大学生创新创业训练计划项目(S201910435050,S202010435067)

作者简介: 王磊(1996—),男,硕士生

通信作者: 赵海燕 E-mail: xinyuyuan@163.com

硝酸(含量 70%)、双氧水(含量 40%)、高氯酸(含量 70%)、氢氟酸(40%)(均为 BV III 级),北京化学试剂研究所;内标  $^{72}\text{Ge}$ 、 $^{115}\text{In}$ 、 $^{209}\text{Bi}$  和外标,中国标准物质采购中心。

## 1.2 仪器与设备

Mars 240/50 微波消解仪,美国 CEM 公司;7700 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪,美国安捷伦公司;Milli-Q 超纯水机,美国 Millipore 公司;DV4000 精确控温电热消解器,北京安南科技有限公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 样品采集

1.3.1.1 花生采集 2019 年 9 月,在即墨市、沂水县和莱州市的试验田,每个花生品种的种植区域内,随机采集  $1\text{ m}^2$  区域的花生植株,每个品种采集 3 份,共采集样品 27 份。每墩花生植株去除根和茎叶,只保留果壳。去除果壳上的泥土,挑选无破损、果壳较大的装入网袋中,标注产地和品种。

1.3.1.2 土壤采集 以花生采样点为中心,画一边长约 40 cm 的正方形,在正方形的 4 个顶点上用土铲向下挖,于 0~20 cm 处取土壤样品,每个采样点采集 200 g 土壤样品置塑封袋中,标记产地。

1.3.1.3 降水采集 为了保证收集到的雨水具有代表性,在降雨开始时,每隔 5 min 收集 1 次雨水,每次持续 10 min,0.5 h 后每隔 10 min 收集 1 次,直到降雨结束。各地区降水时,将 100 mL 塑料瓶置 2 m 高的采样台上,避开污染源,四周无遮挡的高大树木或建筑物,收集后记录降水时间,拧紧瓶盖置阴凉干燥处保存,在采集花生时一同带回实验室。

### 1.3.2 样品预处理

1.3.2.1 花生样品预处理 首先将带壳花生在阳光下暴晒 3 d,除去花生中大部分水分,然后挑出损坏的花生丢弃。将筛选出的花生样品剥壳,保留外部红衣,将完整无破损的花生籽粒用去离子水清洗干净。清洗时佩戴一次性手套,避免用手直接接触花生仁,按四分法取 30 g 花生籽粒样品,然后将花生籽粒置于平板中,在烘箱内烘至恒重,用研钵研磨粉碎,做好标记装入塑封袋,置干燥器内备用,避免返潮现象。

准确称取预处理后的花生粉末样品 0.25 g,放

入 25 mL 聚四氯乙烯微波消解管中,加入 6 mL 硝酸,盖上盖子反应 2 h,再加入 2 mL 双氧水反应 30 min,放入微波消解仪中,按设定程序进行升温消解。

微波消解仪工作条件:功率 1 600 W,消解温度 180 °C。样品消解完成后冷却,从密闭微波消解仪中取出消解管,置于精确控温电热消解器中 180 °C 加热 60 min 进行赶酸,至剩余  $(0.75\pm 0.25)$  mL,用超纯水定容至 100 mL,待测。

### 1.3.2.2 土壤样品预处理

1) 种源土壤样品自然风干,除去肉眼可见的植物根茎等杂质和大于 5 mm 的沙砾,然后,用研钵研磨粉碎,过 100 目筛,置干燥器内备用。

2) 对种源土壤粉末样品进行消解 准确称取预处理后的土壤样品 0.05 g,放入 25 mL 聚四氯乙烯微波消解管中,加入 8 mL 硝酸和 2 mL 氢氟酸后放入微波消解仪中消解,按照设定的步骤进行升温消解。

微波消解仪工作条件:功率 1 600 W,消解温度 185 °C,样品消解完并冷却后,从密闭微波消解仪中取出消解管,置于精确控温电热消解器中 180 °C 加热 60 min 进行赶酸,至剩余  $(0.75\pm 0.25)$  mL,用超纯水定容至 100 mL,待测。

1.3.2.3 降水样品预处理 参考王珊珊等<sup>[24]</sup>处理降水的方法:取适量雨水样品,用 0.45  $\mu\text{m}$  过滤器过滤后置于 50 mL 聚四氟乙烯坩埚中,加入 0.8 mL 硝酸和 50  $\mu\text{L}$  氢氟酸,拧紧盖子,于 130 °C 加热 5 h 后取出坩埚,打开盖子,让挥发性有机物挥发后再次拧紧盖子,于 180 °C 烘箱内加热 12 h。取出坩埚,冷却后向其中加入 0.5 mL 硝酸继续蒸干,向坩埚内加入 0.2 mL 50  $\mu\text{g/L}$  铊内标液,同时加入稀硝酸(体积比为 3:1),再次将坩埚置于 140 °C 烘箱内加热 5 h。

1.3.3 样品分析 利用 ICP-MS 测定花生、土壤和降水中 Cr、Ni、As、Cd、Sb、Tl 和 Pb 7 种重金属元素含量。ICP-MS 的工作参数为:射频功率 1 200 W,冷却器流速 1.47 L/min,载气及辅助气流速 1 L/min,等离子体气体流速 15 L/min,雾化室温度 2 °C。以元素  $^{72}\text{Ge}$ 、 $^{115}\text{In}$  和  $^{209}\text{Bi}$  作为内标,每个样品或标准物质重复测定 3 次,当内标的相对标准偏差大于 5%时,重新测定样品。

## 1.4 数据处理

使用 IBM SPSS 25.0 软件对花生籽粒、土壤及降水中重金属含量数据进行单因素方差分析( $P < 0.05$  和  $P < 0.01$ )、Duncan 多重比较分析( $P < 0.05$ )、多因素方差分析和 Pearson 相关分析。采用单因素方差分析检验不同产地、品种花生样品中重金属元素含量间是否存在显著性差异;采用 Duncan 多重比较分析探究存在显著性差异的元素在不同产地、不同品种中含量的特征;利用多因素方差分析探究产地、品种及其交互作用对花生籽粒中重金属元素含量变化的贡献;采用 Pearson 相关分析研究花生中重金属元素与种源土壤、降水中相应元素含量是否存在显著线性关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 花生籽粒中重金属含量的影响因素分析

2.1.1 不同产地花生籽粒重金属含量 不同地区花生籽粒样品中 7 种重金属浓度的平均值和标准偏差见表 1。单因素方差分析结果表明:重金属元素 Ni、As、Cd 和 Tl 含量在 3 个地区间差异极显著 ( $P < 0.01$ );Cr 含量在 3 个地区间差异显著 ( $P < 0.05$ );Sb 和 Pb 含量在不同地区间差异不显著。当元素浓度在统计学上有显著差异时,使用 Duncan 多重比较来比较平均数。Duncan 多重比较分析表明,不同地区花生籽粒中的重金属含量各有特点。与其它两个地区相比,即墨市花生籽粒中重金属 Cr 含量最高,Ni 含量最低;沂水县的花生籽粒样品中 Tl 含量最高,而 As 含量明显低于其它两个地区;莱州的样品中 Cd 含量最高。吕伟<sup>[25]</sup>检测不同产区花生样品矿质元素含量时发现重金属 Pb 和 Sb 含量存在显著差异。

表 1 不同产地花生籽粒样品重金属含量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

Table 1 The heavy metal concentrations of peanut samples from different regions ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

元素	即墨	沂水	莱州
Cr*	50.79 $\pm$ 9.03 <sup>b</sup>	43.55 $\pm$ 6.87 <sup>a</sup>	40.05 $\pm$ 5.34 <sup>a</sup>
Ni**	3 388 $\pm$ 2 185 <sup>a</sup>	9 621 $\pm$ 2 486 <sup>b</sup>	9 736 $\pm$ 1 772 <sup>b</sup>
As**	13.14 $\pm$ 8.72 <sup>b</sup>	5.52 $\pm$ 0.57 <sup>a</sup>	12.66 $\pm$ 1.22 <sup>b</sup>
Cd**	68.78 $\pm$ 16.08 <sup>a</sup>	54.94 $\pm$ 20.94 <sup>a</sup>	288.14 $\pm$ 17.25 <sup>b</sup>
Sb	1.96 $\pm$ 1.30	1.52 $\pm$ 0.60	1.14 $\pm$ 0.74
Tl**	0.32 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	0.67 $\pm$ 0.30 <sup>b</sup>	0.35 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>
Pb	10.04 $\pm$ 5.52	18.19 $\pm$ 15.49	19.31 $\pm$ 8.53

注:表格中数据用“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示;\* 和 \*\* 分别表示元素含量在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平;不同字母 a、b 是 Duncan 多重比较的结果,表示具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

2.1.2 不同品种花生籽粒重金属含量 对海花 1 号、鲁花 11 号和大白沙 3 个品种的重金属含量进行单因素方差分析,从表 2 可看出,元素 As 在 3 个品种间存在显著性差异( $P < 0.05$ ),其它重金属元素没有显著性差异。通过对存在显著性差异的元素进行 Duncan 多重比较可知,大白沙品种中 As 含量最高,鲁花 11 号中 As 含量最低。不同品种花生对不同重金属元素的吸收程度差异不明显。赵明等<sup>[22]</sup>的研究中也发现,不同品种的花生籽粒中重金属 Pb、Cd 和 Cr 的含量差异不明显。

2.1.3 产地、品种及其交互作用对花生籽粒中重金属含量变化的贡献 通过计算分析各因素对重

金属含量变化的贡献率,如表 3 所示。重金属 Cr、Sb 和 Pb 含量主要受误差影响,可能是因为这些重金属在花生籽粒中含量不高或受肥料、农药等因素的影响。Takeda 等<sup>[26]</sup>比较日本西部区域 14 种重金属含量与来源时指出,重金属含量受季节因素的影响;重金属 Ni、Cd 和 Tl 的含量主要受产地影响;重金属 As 含量主要受产地 $\times$ 品种交互作用的影响;花生中重金属含量受品种影响较小。

通过上述分析可知,花生中重金属含量主要受产地的影响,受品种影响较小。与产地密切相关的来源主要有种源土壤和产地降水。花生中重金属主要来源于产地的土壤还是降水待查。

表2 不同品种花生籽粒样品重金属含量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )Table 2 The heavy metal concentrations of peanut samples of different varieties ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

元素	海花1号	鲁花11号	大白沙
Cr	42.46 $\pm$ 8.01	45.34 $\pm$ 5.30	46.59 $\pm$ 11.06
Ni	7 820 $\pm$ 4 834	6 414 $\pm$ 3 275	8 511 $\pm$ 2 666
As*	9.11 $\pm$ 3.33 <sup>ab</sup>	7.77 $\pm$ 5.56 <sup>a</sup>	14.44 $\pm$ 8.15 <sup>b</sup>
Cd	140 $\pm$ 94	128 $\pm$ 106	143 $\pm$ 102
Sb	1.29 $\pm$ 0.82	1.72 $\pm$ 0.71	1.61 $\pm$ 1.30
Tl	0.31 $\pm$ 0.12	0.54 $\pm$ 0.25	0.49 $\pm$ 0.32
Pb	11.01 $\pm$ 5.78	15.66 $\pm$ 13.93	20.87 $\pm$ 10.89

注:表格中数据用“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示;\*表示元素含量在 $P < 0.05$ 水平;不同字母a、b是Duncan多重比较的结果,表示具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

表3 各影响因素对重金属含量变化的方差贡献率(%)

Table 3 The contribution rate of each factor to the heavy metal content variability(%)

元素	产地	品种	产地 $\times$ 品种	误差
Cr	30.0	4.5	21.5	43.9
Ni	67.8	5.9	24.7	1.6
As	34.4	23.6	40.1	1.8
Cd	97.5	0.4	1.8	0.3
Sb	12.9	3.9	6.9	76.3
Tl	41.4	15.0	17.4	26.2
Pb	14.4	13.7	11.0	60.9

## 2.2 花生籽粒中重金属来源分析

2.2.1 土壤中重金属含量分析 表4分别表示3个地区土壤样品中7种重金属含量的平均值和标准差。可以看出,7种元素在3个地区之间均存在极显著差异( $P < 0.01$ )。通过Duncan多重比较分析得出以下结论:在即墨的土壤样品中,Ni、Cd和

Pb平均浓度在3个地区中较高;沂水的土壤样品与其它两个地区相比,Cr的含量较高,而Ni、Sb、Tl和Pb含量较低;莱州的土壤样品中,As、Sb和Tl含量较高。这些结果表明,不同地区的重金属组成存在差异,沂水地区土壤中的重金属含量较少。Yang等<sup>[27]</sup>和Jing等<sup>[28]</sup>研究均发现,土壤中重金属含量与母质土壤、土壤类型和土壤成分等因素有密切关系。因本研究中3个地区的土壤类型等因素各不相同,故土壤中重金属含量存在较大差异。

2.2.2 降水中重金属含量分析 如表5所示,不同地区的降水样品中7种重金属含量均存在显著性差异( $P < 0.01$ ),对存在差异的元素通过Duncan多重比较分析得出结论:即墨地区的降水样品中,Tl和Pb的含量高于其它两个地区,Ni和As的含量较低;莱州的降水样品中Ni、As和Sb含量最高,Tl含量最少;沂水的样品中Cr和Cd的含量最高。降水样品中重金属含量差异可能与种植区域的地理位置和人为环境有关,种植区域周边的大气污染物不同,也会导致降水样品中重金属含量

表4 不同产地土壤样品重金属含量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )Table 4 The heavy metal concentrations of soil samples from different regions( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

元素	即墨	沂水	莱州
Cr**	34 920 $\pm$ 933 <sup>a</sup>	45 580 $\pm$ 3 982 <sup>b</sup>	38 615 $\pm$ 648 <sup>a</sup>
Ni**	20 997 $\pm$ 961 <sup>c</sup>	17 154 $\pm$ 56 <sup>a</sup>	18 783 $\pm$ 336 <sup>b</sup>
As**	32 229 $\pm$ 1 458 <sup>a</sup>	35 286 $\pm$ 5 764 <sup>a</sup>	43 636 $\pm$ 5 040 <sup>b</sup>
Cd**	164 $\pm$ 2 <sup>b</sup>	103 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	103 $\pm$ 4 <sup>a</sup>
Sb**	979 $\pm$ 26 <sup>b</sup>	797 $\pm$ 28 <sup>a</sup>	1 115 $\pm$ 19 <sup>c</sup>
Tl**	377 $\pm$ 12 <sup>b</sup>	291 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	405 $\pm$ 4 <sup>c</sup>
Pb**	20 574 $\pm$ 1 656 <sup>c</sup>	12 911 $\pm$ 98 <sup>a</sup>	16 696 $\pm$ 472 <sup>b</sup>

注:表格中数据用“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示;\*\*表示元素含量在 $P < 0.01$ 水平;不同字母a、b、c是Duncan多重比较的结果,表示具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

的差异。此外,赵文杰等<sup>[29]</sup>研究发现降水中重金属含量不仅受元素本身性质(亲水性、疏水性)的影响,也会受降水 pH 以及气象条件风速风向、湿度等的影响。Sakata 等<sup>[30]</sup>研究日本 3 个地区雨水中金属元素来源时指出,受西北季风的影响,As、Cd 和

Pb 在春季和冬季含量较高,Ni 的季节差异不明显,也说明降水中重金属含量受到季节和风向因素的影响。即使是同一省份的 3 个地区的降水样品也存在显著性差异。

表 5 不同产地降水样品重金属含量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

Table 5 The heavy metal concentrations of precipitation samples from different regions ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )			
元素	即墨	沂水	莱州
Cr**	$5.70 \pm 0.12^a$	$7.28 \pm 2.43^b$	$5.87 \pm 1.14^a$
Ni**	$3.31 \pm 0.33^a$	$3.99 \pm 1.85^b$	$4.94 \pm 1.28^c$
As**	$1.32 \pm 0.65^a$	$3.51 \pm 3.12^b$	$8.65 \pm 5.20^c$
Cd**	$0.28 \pm 0.19^a$	$0.67 \pm 0.62^b$	$0.13 \pm 0.03^a$
Sb**	$0.58 \pm 0.04^a$	$0.52 \pm 0.15^a$	$1.27 \pm 0.52^b$
Tl**	$0.094 \pm 0.059^c$	$0.057 \pm 0.017^b$	$0.033 \pm 0.011^a$
Pb**	$4.33 \pm 1.76^b$	$2.07 \pm 0.79^a$	$2.45 \pm 0.91^a$

注:表格中数据用“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示;\*\*表示元素含量在  $P < 0.01$  水平;不同字母 a、b、c 是 Duncan 多重比较的结果,表示具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2.3 花生籽粒与土壤及降水中重金属含量关系

为进一步分析花生中各种重金属与土壤、降水中相关元素含量之间的关系,对花生与土壤或降水中的相应元素含量进行 Pearson 相关性分析。结果表明,花生与土壤中 Cd( $r=0.469, P < 0.01$ )含量呈极显著正相关,Cr( $r=-0.319, P < 0.01$ )、Ni( $r=-0.712, P < 0.01$ )和 Tl( $r=-0.491, P < 0.01$ )含量呈极显著负相关,As、Sb 和 Pb 元素含量相关性不显著。说明花生中 Cd 随土壤中 Cd 浓度的增加而增加,元素 Cr、Ni 和 Tl 随土壤中元素 Cr、Ni 和 Tl 含量的增加而降低。由此可见花生植株在重金属浓度较高的土壤中对 3 种重金属的吸收程度较低。吕伟<sup>[25]</sup>发现花生中 Cd 与土壤中 Cd 的相关系数高达 0.625,呈极显著正相关。蔡葵等<sup>[31]</sup>也发现花生对土壤中 Cd 的富集系数较高,花生中的 Cd 主要来自土壤。这些发现与本试验结果一致。Xiong 等<sup>[32]</sup>通过研究莲藕中重金属与土壤的相关性,发现莲藕中的重金属主要独立于土壤或与土壤呈负相关积累,这一发现与本试验结果相似。本试验中,土壤中重金属 As 和 Pb 含量较高,而花生中 As 和 Pb 含量与土壤并没有显著的相关性,说明花生中 As 和 Pb 的积累机制复杂。

花生与降水中 Ni( $r=0.241, P < 0.05$ )含量呈显

著正相关,Cd( $r=-0.328, P < 0.01$ )含量呈极显著负相关,其它元素含量相关性不显著。说明花生植株主要从降水中吸收 Ni,花生中 Cd 元素主要来源于土壤。花生中 As、Sb、Pb 的含量与土壤和降水中相关元素的含量都没有显著相关性,说明花生中的重金属元素来源除了土壤和降水,还可能来源于其它途径,如植株叶片从空气中吸收喷洒其它农作物的农药肥料,大气中悬浮的重金属颗粒等。也可能花生与种源土壤和降水中的重金属的含量不是简单的线性关系,需进一步探究。另外,为深入了解花生中重金属的来源,土壤和降水中重金属被花生吸收的方式和运输富集途径等还需进一步探究。

### 3 结论

花生中重金属元素 Ni、Cd 和 Tl 的含量主要受产地的影响;As 的含量受产地 $\times$ 品种交互作用的影响,Cr、Sb 和 Pb 的含量变化受其它因素影响较大。花生中 As、Sb 和 Pb 的含量与土壤和降水中相关元素的含量没有显著相关性,Cd 和 Ni 含量与土壤和降水均呈现显著相关性,Cr 和 Tl 含量与土壤中元素含量显著相关。表明花生中重金属含量受产地、品种的影响,其来源不仅包括土壤和降

水,还可能有农药和肥料等其它来源。

### 参 考 文 献

- [1] 刘璇,张淑霞,吴曼,等.花生重金属富集特征及防控对策研究进展[J].山东农业科学,2020,52(3):144-150.  
LIU X, ZHANG S X, WU M, et al. Research advances on heavy metal enrichment characteristics in peanut and its prevention and control measurements [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(3): 144-150.
- [2] 王岩,曹慧慧,周禹,等.河北省花生品种营养成分分析及评价[J].食品工业,2020,41(5):345-348.  
WANG Y, CAO H H, ZHOU Y, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of peanut varieties in Hebei Province[J]. Food Industry, 2020, 41(5): 345-348.
- [3] 张忠信,王庆东,赵婧伊,等.不同花生品种秸秆与籽仁营养成分综合分析[J].植物遗传资源学报,2020,21(1):215-223.  
ZHANG Z X, WANG Q D, ZHAO J Y, et al. Nutritional components comprehensive analysis of stalk and kernels in different peanut varieties [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(1): 215-223.
- [4] 邓源喜,张姚瑶,董晓雪,等.花生营养保健价值及在饮料工业中的应用进展[J].保鲜与加工,2018,18(6):166-169,174.  
DENG Y X, ZHANG Y Y, DONG X X, et al. Nutritional and health value of peanut and its utilization in beverage industry[J]. Storage and Process, 2018, 18(6): 166-169, 174.
- [5] 吴慧敏,刘兴泉,吴峰华,等.红花生芽和黑花生芽主要营养成分分析[J].营养学报,2018,40(3):310-312.  
WU H M, LIU X Q, WU F H, et al. Analysis of major nutritional components in red and black peanut sprouts[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2018, 40(3): 310-312.
- [6] 王晓晶,呼凤兰,秦燕阳.重金属胁迫对不同花生种子萌发及生理的影响[J].种子,2018,37(10):89-92.  
WANG X J, HU F L, QIN Y Y. Effects of heavy metal stress on the germination and physiology of different peanut seeds[J]. Seed, 2018, 37(10): 89-92.
- [7] 吴扬.四川地区典型重金属污染土壤的钝化修复实验研究[D].成都:成都理工大学,2018.  
WU Y. Experimental study on passive remediation of typical heavy metal contaminated soils in Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [8] 李智鸣.不同花生品种对铬的吸收差异及调控措施研究[D].广州:华南农业大学,2016.  
LI Z M. Study on the absorption of chromium by different peanuts varieties and its regulation measures[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [9] 罗子锋,周峰平,高岐.花生农作物对污染土壤中重金属镉的富集研究[J].广州化工,2016,44(2):132-133,148.  
LUO Z F, ZHOU F P, GAO Q. Research on the enrichment of cadmium in contaminated soil by peanut crops[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(2): 132-133, 148.
- [10] 邵日晶,许洋.辽宁省部分花生产区土壤重金属污染评价[J].辽宁农业科学,2014(1):42-44.  
TAI R J, XU Y. Evaluation of soil heavy metal pollution in the part of peanut producing areas of Liaoning Province[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2014(1): 42-44.
- [11] 陈虎.钙对花生吸收积累镉的影响研究[D].济南:山东师范大学,2013.  
CHEN H. Effect of calcium on cadmium absorption and accumulation of peanut [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013.
- [12] 陈虎,郭峰,郭笃发,等.山东花生主产区花生镉含量与土壤交换性钙含量的关系及其健康风险评估[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1884-1890.  
CHEN H, GUO F, GUO D F, et al. The relationship between cadmium contents of peanut and contents of exchangeable calcium in soil in main production area in Shandong Province and the health risk assessment to human health[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1884-1890.
- [13] 张忠信,汤丰收,张新友,等.河南省花生产区土壤重金属含量分析[J].河南农业科学,2011,40(12):91-92,97.  
ZHANG Z X, TANG F S, ZHANG X Y, et al. Simply analysis of soil heavy metal in peanut production regions in Henan Province [J]. Journal of

- Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(12): 91–92, 97.
- [14] 高芳, 张佳蕾, 杨传婷, 等. 钙对镉胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2907–2912.
- GAO F, ZHANG J L, YANG C T, et al. Effects of applying calcium on peanut physiological characteristics, its yield and kernel quality under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2907–2912.
- [15] 郭观林. 东北黑土重金属污染发生机理及健康动力学研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2006.
- GUO G L. Contaminative mechanisms of heavy metals and soil–health dynamics in phaeozem of north-east China [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [16] 郑海, 潘冬丽, 黎华寿, 等. 不同浓度镉污染土壤对22个花生品种籽粒镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1255–1256.
- ZHENG H, PAN D L, LI H S, et al. The effect of soil cadmium content on seeds cadmium content of 22 different peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars genotypes[J]. Journal of Agro–Environment Science, 2011, 30(6): 1255–1256.
- [17] 蔡葵, 于秋华, 赵征宇, 等. 花生不同品种植株重金属As和Hg的富集与转运规律[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 167–172.
- CAI K, YU Q H, ZHAO Z Y, et al. As and Hg accumulation and transformation rules in different varieties of peanut plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(24): 167–172.
- [18] WANG X B, LIU W X, LI Z G, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation [J]. Pedosphere, 2020, 30(4): 555–562.
- [19] LI M L, CUI W J, ZHUANG Y M, et al. Inoculation of AM Fungi: An effective tool to reduce Cd accumulation in peanut kernel[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2017, 19(5): 1047–1053.
- [20] GU Q B, YU T, YANG Z F, et al. Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: A case study of Guangxi, China[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, 70: 103199.
- [21] BIANUCCI E, SOBRINO J, CARPENA O, et al. Contribution of phytochelatins to cadmium tolerance in peanut plants [J]. Metallomics, 2012, 4: 1119–1124.
- [22] 赵明, 蔡葵, 任艳, 等. 不同花生品种重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr富集与转运规律[J]. 花生学报, 2010, 39(3): 1–7.
- ZHAO M, CAI K, REN Y, et al. Bioaccumulation and transformation of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in different peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars[J]. Journal of Peanut Science, 2010, 39(3): 1–7.
- [23] 于成广, 李博, 杨晓波, 等. 不同花生品种间重金属元素分布特征[J]. 安徽农业科学, 2007(12): 3505, 3511.
- YU C G, LI B, YANG X B, et al. Distribution characteristics of heavy metal in different peanuts[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(12): 3505, 3511.
- [24] 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 等. 厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4783–4790.
- WANG S S, CHENG Y F, YAN J P, et al. Distribution characteristics and sources of metal elements in rainwater in Xiamen[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4783–4790.
- [25] 吕伟. 花生产品的溯源技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- LÜ W. Study on the traceability technology for peanut products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [26] TAKEDA K, MATUMOTO K, MINAMIKAWA T, et al. Three-year determination of trace metals and the lead isotope ratio in rain and snow depositions collected in Higashi–Hiroshima, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 4525–4535.
- [27] YANG J, WANG J Y, QIAO P W, et al. Identifying factors that influence soil heavy metals by using categorical regression analysis: A case study in Beijing, China [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2020, 14(3): 37.
- [28] JING F, CHEN X M, YANG Z J, et al. Heavy metals status, transport mechanisms, sources, and factors affecting their mobility in Chinese agricultural soils [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(3): 104.
- [29] 赵文杰, 李翠梅. 大气降水中重金属的研究[J]. 环境

- 科学与管理, 2013, 38(10): 76-79.
- ZHAO W J, LI C M. Study of heavy metal pollutants in precipitation[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(10): 76-79.
- [30] SAKATA R, MARUMOTO K, NARUKAWA M, et al. Regional variations in wet and dry deposition fluxes of trace elements in Japan[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(3): 1691-1701.
- [31] 蔡葵, 于秋华, 赵征宇, 等. 花生对土壤中铅和镉的吸收分配规律[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(3): 119-124.
- CAI K, YU Q H, ZHAO Z Y, et al. Absorption and distribution rules of peanut Pb and Cd in soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2010, 12(3): 119-124.
- [32] XIONG C H, ZHANG Y Y, XU X G, et al. Lotus roots accumulate heavy metals independently from soil in main production regions of China[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 295-302.

### The Influence Factors and Sources of Heavy Metals in Peanuts

Wang Lei, Tang Juan, Yu Chundi, Ding Qiuxian, Zhao Haoqing, Yang Qingli, Zhao Haiyan\*  
(College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong)

**Abstract** In this study, in order to analyze the influence factors and sources of heavy metals in peanuts, the field experiment of geographical origin and variety was conducted. Peanut, soil, and precipitation samples were collected, and the concentrations of seven heavy metals were determined in all the samples. Combined with one-way analysis of variance (ANOVA), multi-way ANOVA, and Pearson correlation analysis, the influences of geographical origin, variety, and their interaction on the contents of heavy metals in peanut kernels were analyzed, and the relationships between the heavy metal contents in peanut and those in the provenance soil or precipitation were explored. The results indicated that the variations of Ni, Cd, and Tl contents in peanut were mainly affected by the region; the variation of As content was mainly affected by the interaction of origin and variety; while the variations of the contents of Cr, Sb, and Pb could be mainly affected by other factors. The contents of As, Sb, and Pb in peanut had no significant correlation with those in soil or precipitation; the contents of Cd and Ni in peanut had significant correlation with both soil and precipitation; and the contents of Cr and Tl in peanut were significantly related to those in soil. This study suggested that the contents of heavy metals in peanuts were affected by the origin and variety, and its sources include not only soil and precipitation, but also other sources such as pesticides and fertilizers.

**Keywords** peanut; heavy metal; geographical origin; variety; soil; precipitation